DOI：10.13382/j.jemi.B2306366

基于开关状态的三电平 NPC 整流器开路故障诊断*

陈铭芸　何怡刚　赵莹莹
（武汉大学电气与自动化学院　武汉　430072）

摘　要：为了降低三电平中点钳位型（NPC）整流器故障诊断算法的复杂度和成本，本文提出基于开关状态的开关开路故障诊断方法。首先，选取某些开关状态在半个电流周期的累计值作为诊断变量，并结合自适应阈值及电流相位实现故障桥臂的检测。其次，执行基于无功电流注入的外开关故障容错控制并对阈值进行更新。最后，在容错期间基于诊断变量的变化情况，实现故障开关的定位。所提出的方法能够同时实现单和双开关开路故障诊断，而无需额外的传感器以及复杂的计算和诊断规则，具有实现简单和成本低的优点。实验结果验证了所提出方法的有效性和鲁棒性。

关键词：故障诊断；中点钳位型整流器；开路故障；开关状态
中图分类号：TN358；TM461　　**文献标识码**：A　　**国家标准学科分类代码**：470.40

Open-circuit fault diagnosis of three-level NPC rectifier based on switching states

Chen Mingyun　He Yigang　Zhao Yingying
（School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China）

Abstract: In order to reduce the diagnostic complexity and cost of the three-level neutral-point-clamped (NPC) rectifier, a fault diagnosis method for the open-circuit fault of power switches was proposed. This method was based on the characteristics of switching states. Firstly, the cumulative values of some switching states in half a current cycle were selected as the diagnostic variables, which were combined with the self-adaptive threshold and the phase of currents to realize the faulty bridge arm detection. Then, the outer-switch fault-tolerant control based on reactive current injection was implemented and the threshold was updated. Finally, according to the change of diagnostic variables, the faulty switch was located during fault-tolerant process. The proposed method can realize both single-switch and double-switch open-circuit fault diagnosis without additional sensors, complicated calculations and diagnostic rules. It has the advantages of simple implementation and low cost. The experimental results verify the effectiveness and robustness of the proposed method.

Keywords: fault diagnosis; neutral-point-clamped rectifier; open-circuit fault; switching state

0　引　言

随着可再生能源大规模接入电网，作为电能变换和控制的核心环节，电力电子变换器在新能源系统中的作用日趋凸显，电能系统正迎来电子化的新时代[1]。在众多电力电子变换器中，中点钳位型（neutral-point-clamped, NPC）变换器是目前应用最为广泛的三电平变换器之一。相对于传统两电平变换器，其具有开关器件承受电压低、谐波含量低、能量转换效率高等优点，更适用于高压大容量的场合[2]。

然而，由于开关器件数量多且长期处于高频开关状态，NPC 变换器中的开关器件是最易发生故障的环节之一[3]。为了提高变换器的可靠性、延长其可运行寿命，国

收稿日期：2023-03-25　　Received Date：2023-03-25
*基金项目：国家自然科学基金（51977153，51977161，51577046）、国家重点研发计划（2020YFB0905905，2016YFF0102200）、中央高校基本科研业务费专项资金（2042021kf0233）、国家自然科学基金重点项目（51637004）、装备预先研究重点项目（41402040301）、湖北省重点研发计划项目（2021BEA162）、武汉市局科技计划项目（20201G01）资助

内外研究人员针对开关器件的开路故障诊断方法展开了相关研究[4-5]。根据诊断所使用的信号不同,现有的故障诊断方法可以分为基于电流信号的方法和基于电压信号的方法。基于电流信号的方法根据故障后电流畸变的特征,采用故障特征提取的方法来实现诊断,包括 Park 变换,平均值操作、过零检测、频率估计、小波变换、主元分析等[6-11]。这些方法原理简单,但诊断速度较慢,且对负载的依赖性强。为了提高诊断速度、减小负载依赖性,基于电压信号的方法通过增加电压传感器获得对开路故障敏感的电压信号来实现诊断[12]。由于额外的硬件增加了诊断成本并带来了新的不可靠因素,近年来基于电压模型的方法获得了研究人员的广泛关注。这类方法通过建立数学模型来获得电压估计信号,并与电压测量信号构成电压残差,通过设计合适的诊断阈值和规则来实现诊断[13]。因此,这类方法无需额外的硬件,但受到系统模型和参数认知程度及建模精度的约束,不适用于复杂系统。

以上方法在传统两电平变换器中已经取得了较好的诊断效果。由于开关器件数量的增加和工作原理的不同,当这些诊断方法直接应用于 NPC 变换器时通常无法精确识别故障开关,存在内外开关区分困难的问题[14-15]。针对这一问题,一些文献结合人工智能方法实现了三电平变换器故障特征的自动分类和识别,典型方法包括贝叶斯网络、神经网络、支持向量机等[16-18]。但这些方法的计算量大,难以实现在线诊断。

在三电平变换器在线诊断方面,文献[19]通过结合电流和电压故障特性实现了 Vienna 整流器中单开关开路故障的准确诊断。文献[20]基于三相电压偏差提出了一种针对 NPC 整流器的故障诊断方法。该方法通过建立混合动态逻辑模型来估计输出相电压,利用估计电压与实际电压之间的偏差实现故障诊断,文献[21]针对并网 NPC 逆变器,设计了一种自适应滑模观测器以跟踪和估计三相电流,实现了单开关故障诊断。并通过前次故障状态的自适应滑模观测器同时实现了双开关故障诊断。然而,为了实现精确的故障定位和多开关故障诊断,这些方法需要设计更复杂的诊断规则或是建立多个故障模型,诊断复杂度随诊断能力提高的而显著增加。采用额外的硬件能够降低三电平变换器开路故障诊断方法的复杂度。文献[22]在 NPC 变换器中增加了 3 个电压传感器,通过测量三相极电压来直接监测由开路故障导致的电流路径改变,从而简化了故障诊断方法。为了降低对硬件的需求,文献[23]在 NPC 逆变器中使用一个电流传感器,通过测量中点电流来间接监测开路故障对电流路径的改变,但这种方法仍然增加了诊断的成本。

根据以上分析可知,现有的三电平变换器故障诊断方法通常采用额外的传感器或复杂的数学模型获得对开路故障敏感的诊断变量,因此增加了诊断成本或诊断计算量。为了降低故障诊断方法的成本和复杂度并同时实现单开关和双开关故障诊断,本文针对三电平 NPC 整流器提出了一种基于开关状态的故障诊断方法。该诊断方法分为故障检测和故障定位两个环节。故障检测环节利用了故障后某些开关状态占空比增加的特性实现对开路故障的预警,并结合电流相位实现了故障桥臂的检测;故障定位环节在执行基于无功电流注入的外开关故障容错控制后,通过观察开关状态占空比的变化情况,实现了内外开关故障的区分。最后,通过实验验证了所提出诊断方法的有效性和鲁棒性。

1　NPC 整流器开路故障特性分析

图 1 为三相三电平 NPC 整流器主电路及其控制系统示意图。图中,e_x 和 i_x 分别为交流侧输入相电压和输入相电流,v_{d} 为直流侧电压。S_{xj} 为开关器件(S_{x1} 和 S_{x4} 称为外开关,S_{x2} 和 S_{x3} 称为内开关)。考虑整流器运行在单位功率因数,当 x 相开关信号 $s_x = 1$ 时,S_{x1} 和 S_{x2} 导通、S_{x3} 和 S_{x4} 关断,用开关状态[P]表示,并用 $d_{x,\mathrm{P}}$ 表示其占空比;当 x 相开关信号 $s_x = 0$ 时,S_{x2} 和 S_{x3} 导通、S_{x1} 和 S_{x4} 关断,用开关状态[O]表示,并用 $d_{x,\mathrm{O}}$ 表示其占空比;当 x 相开关信号 $s_x = -1$ 时,S_{x3} 和 S_{x4} 导通、S_{x1} 和 S_{x2} 关断,用开关状态[N]表示,并用 $d_{x,\mathrm{N}}$ 表示其占空比。其中,$x = \mathrm{a}, \mathrm{b}, \mathrm{c}$;$j = 1, 2, 3, 4$。

如图 2(a)所示,当 NPC 整流器正常工作时,根据电流方向和开关信号,将一个电流周期分为 A、B、C 和 D 共 4 个区域。在区域 A 内,开关状态在[N]和[O]之间切换,此时参与构成电流路径的开关为 S_{x3} 和 S_{x4}。在区域 B 内,开关状态在[P]和[O]之间切换,此时参与构成电流路径的开关为 S_{x3}。在区域 C 内,开关状态在[P]和[O]之间切换,此时参与构成电流路径的开关为 S_{x1} 和 S_{x2}。在区域 D 内,开关状态在[N]和[O]之间切换,此时参与构成电流路径的开关为 S_{x2}。

当 NPC 整流器开关发生开路故障时,电流路径发生改变,使得某些开关状态无效,进而导致电流的畸变。如果 S_{x1} 发生开路故障,在区域 C 内负电流无法由 S_{x1} 和 S_{x2} 导通,因此[P]为无效开关状态。如果 S_{x2} 发生开路故障,在区域 C 和 D 内负电流无法由 S_{x1} 和 S_{x2} 导通,也无法由 S_{x2} 和 D_{cx1} 导通,因此[P]和[O]均为无效开关状态。如图 2(b)和(c)所示,当 S_{x1} 或 S_{x2} 发生开路故障后,由于存在无效开关状态,使得 a 相电流无法正常进入负半周,而是在一段时间内保持为 0,称为电流零区。此时,实际电流与参考电流的偏差增大。为了使 a 相电流脱离零区,在闭环控制器的调节作用下,开关状态[P]的占空比增加,导致故障后区域 C 的范围扩大。

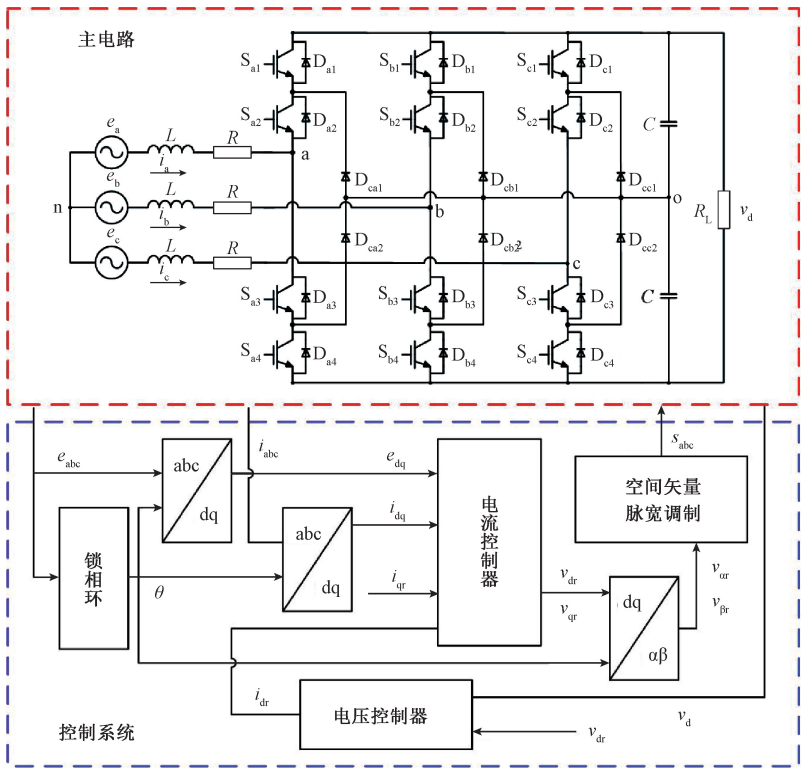

图 1 NPC 整流器及其控制系统

Fig. 1 NPC rectifier and its control system

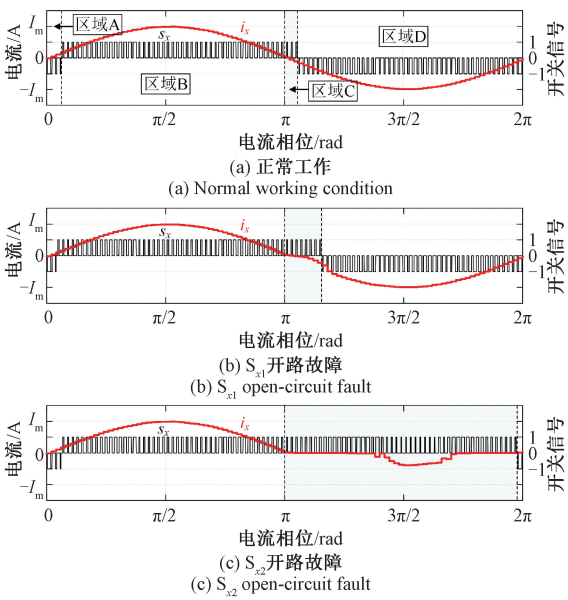

图 2 电流和开关信号

Fig. 2 Current and switching signal

比较外开关 S_{x1} 和内开关 S_{x2} 故障对区域 C 的扩大作用,可以发现由于外开关 S_{x1} 故障仅在 NPC 整流器正常工作时的区域 C 内使开关状态[P]无效,其影响范围较小,故障后区域 C 的扩大程度有限。特别是当 NPC 整流器正常运行于单位功率因数时,区域 C 的范围较小,由整流器电压与电流之间的相位差 $\Delta\theta$ 决定。当 $\Delta\theta$ 足够小时,外开关故障对 NPC 整流器的影响非常小,NPC 整流器仅需 6 个内开关即可保持稳定的直流母线电压[24]。这种情况下,外开关故障可以被忽略。然而,随着 NPC 整流器电流增大、调制比减小,相位差 $\Delta\theta$ 增大,外开关故障对 NPC 整流器的影响也随之扩大。这种情况下,有必要对外开关故障进行诊断,并采取故障隔离和容错等干预措施,维持 NPC 整流器的正常运行。对比之下,内开关 S_{x2} 故障使半个电流周期内的开关状态[P]和[O]无效,其影响范围较大,故障后区域 C 的范围明显扩大。

同理,如果 S_{x4} 发生开路故障,在区域 A 内正电流无法由 S_{x3} 和 S_{x4} 导通,因此[N]为无效开关状态。如果 S_{x3} 发生开路故障,在区域 A 和 B 内正电流无法由 S_{x3} 和 S_{x4} 导通,也无法由 S_{x3} 和 D_{cx2} 导通,因此[N]和[O]均为无效开关状态。当 S_{x3} 或 S_{x4} 发生开路故障后,在闭环控制器的调节作用下,开关状态[N]的占空比增加,导致故障后区域 A 的范围扩大。内开关 S_{x3} 故障对区域 A 的扩大作用明显强于外开关 S_{x4} 故障,并且外开关 S_{x4} 故障的影响范围受 $\Delta\theta$ 的影响。

表 1 总结了不同开关的开路故障特征,本文提出的故障诊断方法将基于该故障特征实现。

表 1　不同开关的开路故障特征

Table 1　Open-Circuit fault characteristics of different switches

开关	故障范围	故障特征
S_{x1}	x 相电流负半周	区域 C 扩大程度低,受 $\Delta\theta$ 影响
S_{x2}	x 相电流负半周	区域 C 扩大程度高
S_{x3}	x 相电流正半周	区域 A 扩大程度高
S_{x4}	x 相电流正半周	区域 A 扩大程度低,受 $\Delta\theta$ 影响

2　故障诊断方法

根据第 1 章开路故障特性分析可知,当 NPC 整流器正常工作时,区域 A 和 C 的范围由 $\Delta\theta$ 决定;当 NPC 整流器开关发生开路故障时,区域 A 或 C 会扩大,可以根据这一特征进行故障诊断。区域 A 的特征是在电流正半周内存在开关状态[N],而区域 C 的特征是在电流负半周内存在开关状态[P]。因此,本文结合电流相位和开关状态[N]和[P]的特征构造诊断变量,提出一种新的三相三电平 NPC 整流器开路故障诊断方法。

2.1　故障检测方法

采用开关状态[N]的占空比在电流正半周内累计值来确定区域 A 的范围,采用开关状态[P]的占空比在电流负半周内的累计值来确定区域 C 的范围。因此,诊断变量可以计算为:

$$d_x=\begin{cases}0, r_x\neq r_{x-1}\\ d_{x,\mathrm{N}}+d_{x-1}, r_x=r_{x-1}=0\\ d_{x,\mathrm{P}}+d_{x-1}, r_x=r_{x-1}=1\end{cases}\tag{1}$$

其中,d_x 表示当前开关周期内 x 相诊断变量的值,d_{x-1} 表示上一个开关周期内 x 相诊断变量的值。r_x 表示当前开关周期内 x 相电流处于正半周还是负半周,r_{x-1} 表示上一个开关周期内 x 相电流处于正半周还是负半周,可由电流相位确定:

$$r_x=\begin{cases}0, \theta_x\in[0,\pi)\\ 1, \theta_x\in[\pi,2\pi)\end{cases}\tag{2}$$

其中,θ_x 为 x 相电流相位。考虑 NPC 整流器运行在单位功率因数,θ_x 可由整流器控制系统的锁相环获得。

当 NPC 整流器正常工作时,区域 A 和 C 的范围为 $\Delta\theta$:

$$\Delta\theta=\arctan(\omega LI_{\mathrm{m}}/E_{\mathrm{m}})\tag{3}$$

其中,L 为交流滤波电感值。$\omega=2\pi f$,f 为交流电压频率。E_{m} 和 I_{m} 分别为交流电压和电流幅值,可以由两相同步旋转 dq 坐标系下的电压和电流计算得到,即:$I_{\mathrm{m}}=\sqrt{i_{\mathrm{dr}}^2+i_{\mathrm{qr}}^2}$,$E_{\mathrm{m}}=\sqrt{e_{\mathrm{d}}^2+e_{\mathrm{q}}^2}$。如图 1 所示,变量 e_{d}、e_{q}、i_{dr} 和 i_{qr} 均可从 NPC 整流器控制系统中获得。e_{d} 和 e_{q} 为测量电压的 dq 轴分量,i_{dr} 和 i_{qr} 为电流控制器的参考电流。当 NPC 整流器正常工作时,测量电流的 dq 轴分量与其参考电流相近;而当整流器开关发生开路故障后,测量电流的 dq 轴分量会急剧下降,参考电流会因电流控制器调节而增加。因此,采用参考电流而不是测量电流的 dq 轴分量计算电流幅值,可以避免发生误诊断。

根据 $\Delta\theta$ 可以估计 NPC 整流器正常工作时,开关状态[N]和[P]的占空比在电流半周内的累计值,从而确定诊断阈值为:

$$\varepsilon=\frac{k\Delta\theta}{\omega T_{\mathrm{s}}}\tag{4}$$

其中,T_{s} 为开关周期,k 用于衡量正常工作时开关状态[N]和[P]的占空比分别在电流正负半周的平均值。此外,考虑 $\Delta\theta$ 存在计算误差,k 的设置需要为阈值留有一定裕量。本文中,k 取 0.5。

当 NPC 整流器正常工作时,$d_{\mathrm{a}}<\varepsilon$,$d_{\mathrm{b}}<\varepsilon$ 且 $d_{\mathrm{c}}<\varepsilon$。因此,当任意一相诊断变量 $d_x\geqslant\varepsilon$ 时,说明 NPC 整流器存在开路故障,同时说明故障开关位于 x 相,从而实现故障相检测。此外,当 NPC 整流器 x 相上桥臂发生开路故障时,在该相电流负半周 $d_{x,\mathrm{P}}$ 增大,使得诊断变量大于阈值;而当 NPC 整流器 x 相下桥臂发生开路故障时,在该相电流正半周 $d_{x,\mathrm{N}}$ 增大,使得诊断变量大于阈值。因此,电流相位可以用来检测开路故障所在的桥臂。

根据以上分析,表 2 给出了故障桥臂的检测方法。其中,F_{D} 为故障检测标志,$F_{\mathrm{D}}=0$ 表示 NPC 整流器正常工作,$F_{\mathrm{D}}=1$ 表示 NPC 整流器中存在开路故障。$F_{x\mathrm{U}}$ 和 $F_{x\mathrm{L}}$ 为故障桥臂检测标志,$F_{x\mathrm{U}}=0$ 和 $F_{x\mathrm{L}}=0$ 分别表示 x 相上桥臂和下桥臂无开路故障发生,$F_{x\mathrm{U}}=1$ 表示故障开关位于 x 相上桥臂,即至少 S_{x1} 和 S_{x2} 中的一个中存在开路故障。$F_{x\mathrm{L}}=1$ 表示故障开关位于 x 相下桥臂,即至少 S_{x3} 和 S_{x4} 中的一个中存在开路故障。

表 2　故障桥臂检测

Table 2　Faulty bridge arm detection

故障桥臂	r_x	d_x	F_{D}	$F_{x\mathrm{U}}$	$F_{x\mathrm{L}}$
无	-	$<\varepsilon$	0	0	0
x 相上桥臂	1	$\geqslant\varepsilon$	1	1	0
x 相下桥臂	0	$\geqslant\varepsilon$	1	0	1

2.2　故障开关定位方法

在实现 NPC 整流器故障检测的基础上,本节通过执行容错控制,并结合诊断变量增量的故障定位变量,实现故障开关定位。

2.1 节设计的阈值是为了区分 NPC 整流器正常工作状态和开路故障状态,因此该阈值无法实现同桥臂内外开关故障的区分。由 NPC 整流器外开关故障分析可知,上桥臂外开关故障使区域 C 内的开关状态[P]无效,下桥臂外开关故障使区域 A 内的开关状态[N]无效。这是外开关故障导致电流发生畸变以及区域 A 或 C 范围扩大的根本原因。为了区分内外开关故障,可以在完成故

障检测后执行容错控制。通过采用冗余开关状态替换无效开关状态或无功电流注入的方法实现外开关故障的容错[25]。本文以无功电流注入的外开关故障容错方法为例,当检测到 NPC 整流器存在开路故障时,改变电流控制器中 q 轴电流的参考值:

$$i_{qr} = -i_{dr}\tan\Delta\theta \tag{5}$$

注入无功电流后,实际电流相位发生改变。对于任意一相电流,只存在区域 B 和 D。因此,当 6 个外开关中的一个或多个发生开路故障时,在检测到开路故障后执行该容错控制,NPC 整流器能恢复正常运行。同时,由于区域 A 和 C 的消失,故障相诊断变量不再增加。内开关故障除了使区域 A 或 C 中的开关状态[P]或[N]无效外,还会使区域 B 或 D 中的开关状态[O]无效。因此,当内开关发生开路故障时,在检测到开路故障后执行该容错控制,区域 A 或 C 不会消失,且其范围仍然会扩大,即诊断变量持续增加。因此,将诊断变量的增量作为故障定位变量,即:

$$\Delta d_x = d_x - d_{x-1} \tag{6}$$

根据上述分析,执行容错控制后,$\Delta d_x = 0$ 说明可能是外开关故障,$\Delta d_x > 0$ 说明可能是内开关故障。但是,内开关故障不一定会使区域 A 或 C 的范围扩大至半个电流周期,故障后 Δd_x 在一段时间内可能为 0。因此,仅考虑 Δd_x 进行故障定位会造成误诊断。

由于在检测到故障后就执行容错控制,对于外开关故障,故障相诊断变量在半个电流周期内保持略大于阈值的状态且其值基本不变;而对于内开关故障,故障相诊断变量在一段时间内仍然保持较快的增长速度,其值在故障后短时间内远超于阈值。因此,为了避免误诊断,采取阈值更新的方式,将原阈值增加至两倍,重新判断诊断变量与更新后阈值之间的关系。采取阈值更新方法后,阈值设计为:

$$\varepsilon = \begin{cases} \dfrac{k\Delta\theta}{\omega T_s}, F_D = 0 \\ \dfrac{2k\Delta\theta}{\omega T_s}, F_D = 1 \end{cases} \tag{7}$$

在执行容错控制后,结合故障诊断变量 d_x、故障定位变量 Δd_x、阈值 ε 和故障桥臂检测标志,本文提出的故障开关定位方法如表 3 所示。

表 3 故障开关定位

Table 3 Faulty switch location

故障开关	F_{xU}	F_{xL}	d_x	Δd_x	F_{xj}
无	0	0	-	-	$F_{xj}=0$
S_{x1}	1	0	$<\varepsilon$	0	$F_{x1}=1$
S_{x2}	1	0	$\geqslant\varepsilon$	>0	$F_{x2}=1$
S_{x3}	0	1	$\geqslant\varepsilon$	>0	$F_{x3}=1$
S_{x4}	0	1	$<\varepsilon$	0	$F_{x4}=1$

2.3 双开关故障诊断

由于每相故障诊断变量分别代表该相开关的故障特征,双开关故障中的每个故障都可以通过上述方法进行诊断。但是,正常相的区域 A 和 C 也可能受到开路故障的影响。为了确保双开关故障诊断的准确性,需要对不同双开关故障情况进行分析。

1)双外开关故障。检测到开路故障后执行容错控制使得 NPC 整流器在任何外开关故障下都能保持正常运行,因此对于多个外开关故障只能对其中一个故障开关进行定位。故障诊断的一个主要目的就是为容错控制提供必要的信息,通过容错控制使变换器在开路故障状态下能够持续运行。因此,在已经实现容错控制的基础上,不再对其他外开关故障进行定位是可以接受的。

2)双内开关故障。正常相的区域 A 和 C 受故障相的内开关故障影响较大。在上述开关故障定位方法中,采用了阈值更新的方法,在检测到故障后通过提高阈值确保了故障定位的准确性。该步骤同时可以避免将正常相诊断变量增加误认为是该相存在开路故障,从而提高双开关故障诊断的准确性。因此,双内开关故障中的每个故障都可以通过上述方法进行诊断。

3)外和内开关故障。当同相同桥臂的两个开关同时发生开路故障,或者同相同桥臂的内开关和外开关先后发生开路故障,那么外开关的故障特征将被内开关的故障特征掩盖。这种情况下,无法检测到外开关故障,这是多数非基于硬件的故障诊断方法具有的共同特点。当不是同相同桥臂的外和内开关发生开路故障,如果外开关故障发生在内开关故障之后,则该外开关故障也无法被检测到,这和双外开关故障的情况相同。其他情况下,外和内开关故障中的每个故障都可以通过上述方法进行诊断。

图 3 进一步给出故障诊断方法的实现框图。首先,对故障诊断变量 d_x、故障定位变量 Δd_x、阈值 ε 进行计算,并结合电流相位 θ_x 进行如表 2 所示的故障检测。一旦检测到故障发生,执行基于无功电流注入的容错控制并更新阈值。考虑 NPC 整流器系统的延迟时间,在执行容错控制 2 个开关周期后,结合 d_x、Δd_x、ε 和故障桥臂检测标志,根据表 3 实现故障开关的定位。对于多个开关发生开路故障,无需额外的诊断变量和诊断规则,均可以按照图 3 所示的框图进行故障诊断,因此本文提出的故障诊断方法具有计算量小、复杂度低的优点。从图 1 和 3 可以看出,诊断所需的信号和变量均来源于控制系统,因此本文提出的故障诊断方法具有诊断成本低的优点。

3 实验验证

为了验证本文提出的故障诊断方法的有效性和鲁棒

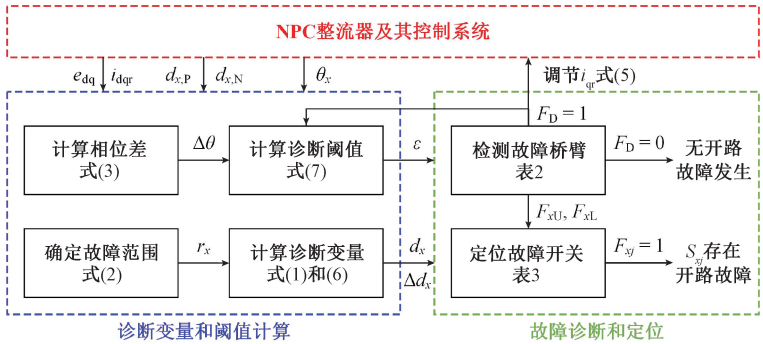

图 3　故障诊断方法框图

Fig. 3　Block diagram of fault diagnosis method

性,搭建如图 4 所示的三相三电平 NPC 整流器实验平台。整流器由绝缘栅双极晶体管(IGBT)组成,其控制及诊断方法由 OP5700 实时仿真器实现,主要参数如表 4 所示。为了更好地展示实验结果,仿真器获得的所有数据都被保存并导入 MATLAB 后进行重新绘制。在实验中,通过禁用相关 IGBT 栅极信号来模拟开路故障,未画出的故障标志意味着这些标志的值始终为 0。

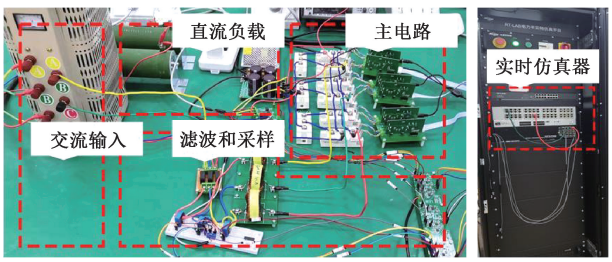

图 4　实验平台

Fig. 4　Experimental platform

表 4　实验参数

Table 4　Experimental parameters

参数	数值
交流侧输入电压 e_x 有效值	50 V
交流侧滤波电感 L	5 mH
直流侧滤波电容 C	940 μF
直流侧负载电阻 R_L	100 Ω
直流侧总电压 v_{dc}	200 V
开关频率 f_s	5 kHz

3.1　单开关开路故障的诊断有效性验证

图 5 给出了外开关 S_{a1} 发生开路故障的诊断结果。可以发现,正常工况下三相诊断变量均小于阈值。当 S_{a1} 发生开路故障后,a 相诊断变量 d_a 迅速增大并超过阈值 ε,说明 NPC 整流器中存在开路故障,故障检测标志 F_D 从 0 变为 1。此时,a 相电流相位在[π,2π]范围内,说明故障开关位于 a 相的上桥臂,故障桥臂检测标志 F_{aU} 从 0 变为 1。在检测到开路故障后,立即触发容错控制并更新阈值。可以发现,a 相诊断变量 d_a 增量为 0 且小于更新后的阈值,说明为外开关故障,故障开关定位标志 F_{a1} 从 0 变为 1。在诊断中采取了对所有外开关故障均有效的容错控制使区域 A 和 C 消失,因此在执行容错控制后三相诊断变量均减小且 a 相畸变电流恢复正常。

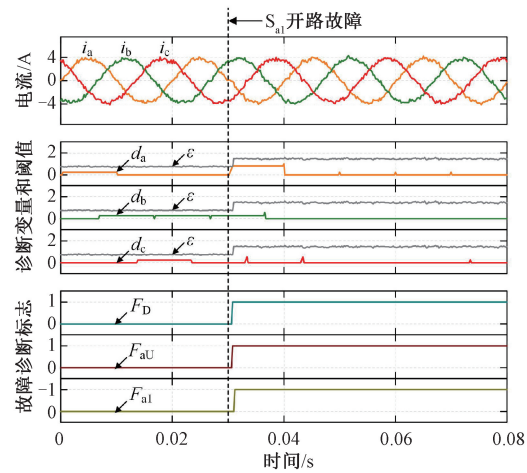

图 5　S_{a1} 发生开路故障的诊断结果

Fig. 5　Diagnostic result of S_{a1} open-circuit fault

图 6 给出了内开关 S_{a2} 发生开路故障的诊断结果。与 S_{a1} 的开路故障相似,当 S_{a2} 发生开路故障后,在 a 相电流负半周诊断变量 d_a 迅速增大并超过阈值 ε,说明 NPC 整流器中存在开路故障且故障开关位于 a 相的上桥臂。在检测到开路故障后,立即触发容错控制并更新阈值。可以发现,a 相诊断变量 d_a 持续增大且迅速超过更新后的阈值,说明为内开关故障,故障开关定位标志 F_{a2} 从 0 变为 1。可以看出,S_{a2} 开路故障对正常相诊断变量具有明显的影响,但 d_b 和 d_c 仍然小于阈值。这是由于在检测到故障后对阈值进行了更新,一方面实现了内外开关故障的准确区分,另一方面也避免了将正常开关误诊断为故障开关,提高了诊断结果的准确性和可靠性。

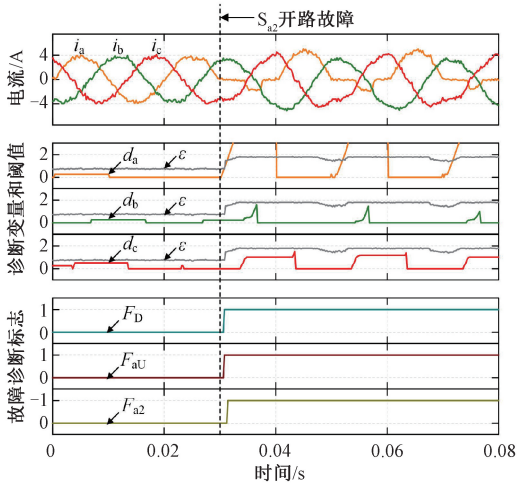

图 6 S_{a2} 发生开路故障的诊断结果

Fig. 6 Diagnostic result of S_{a2} open-circuit fault

3.2 双开关开路故障的诊断有效性验证

图 7 给出了双开关 S_{a2} 和 S_{b3} 同时发生开路故障的诊断结果。a 相诊断变量在 S_{a2} 和 S_{b3} 同时发生开路故障后的表现与图 6 相似,因此 S_{a2} 故障的诊断过程相同。在检测到 S_{a2} 开路故障后,在 b 相电流正半周期诊断变量 d_b 迅速增大并超过更新后的阈值,说明 b 相下桥臂开关中存在开路故障。此时已经执行了容错控制,如果是外开关故障,那么 d_b 将不会超过更新后的阈值,因此可以直接判断是 S_{b3} 存在开路故障。由于在检测到 S_{a2} 开路故障后提高了阈值,S_{b3} 诊断速度相对较慢,这是为了优先确保诊断准确率而对诊断速度做出的牺牲。可以看出,对于多个开关故障,各故障的诊断变量和诊断规则相对独立,因此诊断过程较为简单,无需复杂的变量计算和规则判断。

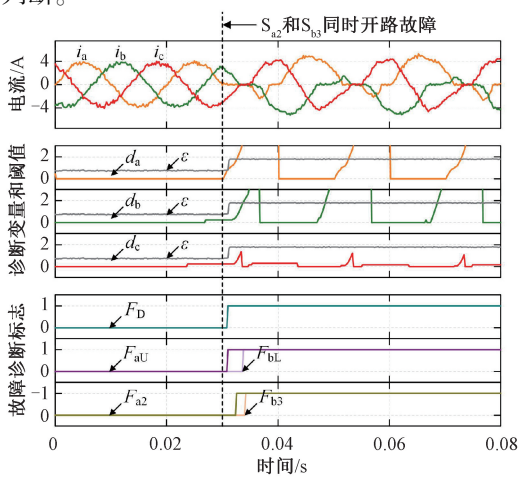

图 7 S_{a2} 和 S_{b3} 同时发生开路故障的诊断结果

Fig. 7 Diagnostic result of S_{a2} and S_{b3} open-circuit fault

3.3 负载突变时的诊断鲁棒性验证

图 8 给出了 NPC 整流器正常工作下将负载由 200 Ω 突变为 100 Ω 后内开关 S_{c2} 发生开路故障的诊断结果。可以看出,由于阈值是根据 NPC 整流器电流电压而自适应变化的,诊断变量虽然在负载突变前后发生了变化,但仍小于阈值。因此,所提出的故障诊断方法在负载突变时不会误诊断。此外,所提出的故障诊断方法在负载改变的情况下仍能快速定位 S_{c2} 的开路故障,证明了所提出的故障诊断方法具有一定的鲁棒性。

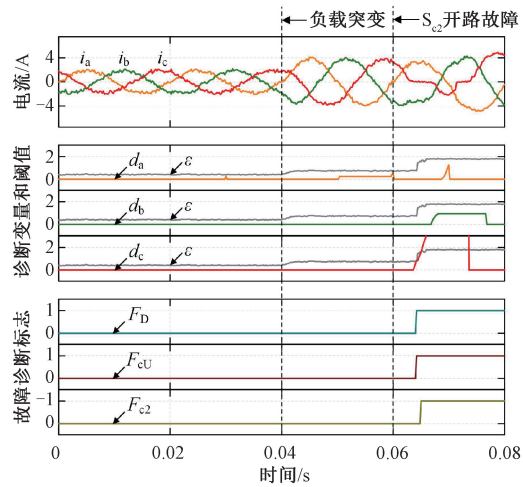

图 8 负载突变下 S_{c2} 发生开路故障的诊断结果

Fig. 8 Diagnostic result of S_{c2} open-circuit fault under load sudden change

3.4 故障诊断方法对比分析

表 5 从诊断速度、诊断成本、鲁棒性、计算复杂度等角度出发,将本文提出的故障诊断方法与现有的三电平 NPC 变换器故障诊断方法进行比较。

表 5 故障诊断方法对比

Table 5 Comparison with relevant fault diagnosis methods

诊断方法	速度	成本	鲁棒性	复杂度	故障种类
文献[15]	中	低	差	低	单开关
文献[17]	慢	低	好	高	单和双开关
文献[20]	快	低	中	中	单开关
文献[21]	中	低	好	中	单和双开关
文献[22]	快	高	好	低	单和双开关
本文	中	低	好	低	单和双开关

在诊断速度方面,文献[17]提出的方法无法实现在线故障诊断,而其他文献以及本文提出的方法均能实现在线故障诊断。其中,诊断速度中等的方法通常能够在一个电流周期内实现故障定位。诊断速度较快的方法通常能够在一个几个到十几个开关周期内实现故障定位,

但这些方法(如文献[20]或文献[22])只能实现单开关故障故障或牺牲诊断成本换取较高的诊断速度。在诊断成本方面,文献[22]提出的方法需要增加额外的电压传感器,因此诊断成本较高。而其他文献以及本文提出的方法无需增加额外的硬件测量电路,因此诊断成本较低。在诊断鲁棒性方面,具有较好鲁棒性的诊断方法应在变换器工作状态发生改变时仍能够准确和迅速地实现故障诊断。文献[15]和文献[20]提出的方法没有考虑变换器不同工作状态下的开路故障情况,因此鲁棒性较差。而其他文献以及本文提出的方法均考虑了变换器不同工作状态下的开路故障情况,并通过设计自适应阈值、自适应观测器以及增加硬件电路等方法提高了鲁棒性。在诊断复杂度方面,文献[17]采用的诊断方法需要基于大量故障数据对神经网络模型进行训练,因此计算量大、诊断算法复杂度高。文献[20]和文献[21]设计了较为复杂的诊断规则或构建了多个故障模型,因此计算量较大。而其他文献以及本文提出的方法能够运用较小的计算量构建诊断变量和诊断规则,因此诊断复杂度较低。

综合各方面的性能,本文提出的故障诊断方法能够同时实现单开关和双开关故障诊断,更能全面地诊断 NPC 整流器开路故障,且具有易于实现、诊断成本低、鲁棒性好的优点。

4　结　论

本文利用故障后开关状态占空比变化特性,设计了一种三相三电平 NPC 整流器单开关和双开关开路故障诊断方法,并通过实验验证了其有效性和鲁棒性,所得结论如下:

1)所提出的诊断方法基于开关状态[P]和[N]在半个周期内的累计值实现故障桥臂的检测。并在检测到开路故障后,在外开关容错控制下利用诊断变量的变化量实现故障开关定位检测。该故障诊断方法计算量小、实现简单,无需增加硬件测量电路,可在低成本下实现在线的故障诊断;

2)所提出的诊断方法采用了各相相对独立的诊断变量和诊断规则,对于双开关故障中每个故障采取相同的方法进行诊断。因此无需增加诊断变量和诊断规则即可同时实现单开关和双开关故障诊断;

3)所提出的诊断方法采用了自适应阈值,使得在负载突变情况下,仍能快速、准确地实现故障诊断,具有较好的鲁棒性。

参考文献

[1] 刘进军. 电能系统未来发展趋势及其对电力电子技术的挑战[J]. 南方电网技术, 2016, 10(3): 78-81.
LIU J J. Future trends of power systems and their challenges to power electronics [J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(3): 78-81.

[2] 唐圣学, 王维威, 马强, 等. 三电平逆变器 IGBT 器件接线故障在线诊断方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(11): 19-30.
TANG SH X, WANG W W, MA Q, et al. Research on on-line diagnosis method of IGBT device wiring faults in three-level inverter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(11): 19-30.

[3] 赵莹莹, 何怡刚, 杜博伦, 等. 基于 LSSA 优化 DBN 的双有源桥变换器开路故障诊断[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(4): 56-64.
ZHAO Y Y, HE Y G, DU B L, et al. Open circuit fault diagnosis of dual active bridge converter based on LSSA optimized DBN[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(4): 56-64.

[4] 刘闯, 寇磊, 蔡国伟, 等. 基于人工智能的电力电子变换器开路故障诊断研究综述[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 2957-2970.
LIU CH, KOU L, CAI G W, et al. Review for AI-based open-circuit faults diagnosis methods in power electronics converters [J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 2957-2970.

[5] 马铭遥, 凌峰, 孙雅蓉, 等. 三相电压型逆变器智能化故障诊断方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(23): 7683-7699.
MA M Y, LING F, SUN Y R, et al. Review of intelligent fault diagnosis methods for three-phase voltage-mode inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(23): 7683-7699.

[6] FREIRE N M A, ESTIMA J O, CARDOSO A J M. Open-circuit fault diagnosis in PMSG drives for wind turbine applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(9): 3957-3967.

[7] 施耀华, 冯延晖, 任铭, 等. 融合电流和振动信号的永磁同步风电系统变流器故障诊断方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(23): 7750-7760.
SHI Y H, FENG Y H, REN M, et al. Study on fault diagnosis method of converter in permanent magnet synchronous wind power system by fusion of current and vibration signals[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(23): 7750-7760.

[8] 何怡刚, 谢望, 施天成, 等. 基于畸变电流的直驱式永磁风电变流器故障诊断研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(8): 20-28.
HE Y G, XIE W, SHI T CH, et al. Study on fault diagnosis of direct drive permanent magnet wind power

converter based on distorted current [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(8): 20-28.

[9] 许水清, 陶松兵, 何怡刚, 等. 基于相电流瞬时频率估计的永磁直驱风电变流器开路故障诊断[J]. 电工技术学报, 2022, 37(2): 433-444.
XU SH Q, TAO S B, HE Y G, et al. Open-circuit fault diagnosis for back-to-back converter of PMSG wind generation system based on estimated instantaneous frequency of phase current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(2): 433-444.

[10] 杨欣荣, 蒋林, 王婧林, 等. 基于小波变换的无刷直流电机逆变器故障诊断[J]. 电测与仪表, 2017, 54(5): 113-118.
YANG X R, JIANG L, WANG J L, et al. Study on fault diagnosis of brushless DC motor inverter based on wavelet transform [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(5): 113-118.

[11] MOOSAVI S S, DJERDIR A, AIT-AMIRAT Y, et al. Artificial neural network-based fault diagnosis in the AC-DC converter of the power supply of series hybrid electric vehicle[J]. IET Electrical Systems in Transportation, 2016, 6(2): 96-106.

[12] 刘犇, 王文江, 陈轩. 基于相电压积分的逆变器开路故障诊断策略[J]. 电子测量技术, 2017, 40(10): 252-254.
LIU J, WANG W J, CHEN X. Inverter fault diagnosis strategy based on phase voltage integral[J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40(10): 252-254.

[13] CHEN Y T, SUN Y, LI X, et al. Active common-mode voltage-based open-switch fault diagnosis of inverters in IM-drive systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(1): 103-115.

[14] ABADI M B, MENDES A M S, CRUZ S M A. Three-level NPC inverter fault diagnosis by the average current Park's vector approach[C]. International Conference on Electrical Machines, 2012: 1893-1898.

[15] LEE J S, LEE K B, BLAABJERG F. Open-switch fault detection method of a back-to-back converter using NPC topology for wind turbine systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(1): 325-335.

[16] CHEN D J, YE Y Z, HUA R. Fault diagnosis of three-level inverter based on wavelet analysis and Bayesian classifier[C]. Chinese Control and Decision Conference, 2013: 4777-4780.

[17] 余运俊, 裴石磊, 万晓凤, 等. NPC 三电平光伏逆变器开路故障诊断[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(5): 41-49.
YU Y J, PEI SH L, WAN X F, et al. Open-circuit fault diagnosis of NPC three-level photovoltaic inverter[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(5): 41-49.

[18] 姬鑫, 陈超波, 张彬彬, 等. 基于 Prony 算法的三电平逆变器开路故障诊断方法[J]. 电测与仪表, 2023, 60(8): 97-104.
JI X, CHEN CH B, ZHANG B B, et al. Open-circuit fault diagnosis method of three-level inverter based on Prony algorithm [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(8): 97-104.

[19] 姚芳, 陆乐, 王刘浏, 等. 基于输入电流和输出电压的 Vienna 整流器单管开路故障诊断方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(3): 82-89.
YAO F, LU L, WANG L L, et al. Method of single switch open circuit fault diagnosis in Vienna rectifier based on input currents and output voltage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(3): 82-89.

[20] 杨宝顺, 陈权, 胡存刚. 基于电压偏差的三电平逆变器故障诊断与定位[J]. 电力电子技术, 2022, 56(6): 19-22.
YANG B SH, CHEN Q, HU C G. Fault diagnosis and location of three-level inverter based on phase voltage deviation[J]. Power Electronics, 2022, 56(6): 19-22.

[21] 许水清, 黄文展, 何怡刚, 等. 基于自适应滑模观测器的中点钳位型三电平并网逆变器开路故障诊断[J]. 电工技术学报, 2023, 38(4): 1010-1022.
XU SH Q, HUANG W ZH, HE Y G, et al. Open-circuit fault diagnosis method of neutral point clamped three-level grid-connected inverter based on adaptive sliding mode observer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(4): 1010-1022.

[22] ABADI M B, MENDES A M S, CRUZ S M A. Method to diagnose open-circuit faults in active power switches and clamp-diodes of three-level neutral-point clamped inverters[J]. IET Electric Power Applications, 2016, 10(7): 623-632.

[23] HE J B, DEMERDASH N A O. An on-line diagnostic method for open-circuit switch faults in NPC multilevel converters [C]. Energy Conversion Congress and Exposition, 2016: 1-7.

[24] CORZINE K A, BAKER J R. Reduced-parts-count multilevel rectifiers[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, 49(4): 766-774.

[25] LEE J S, LEE K B. Open-switch fault tolerance control for a three-level NPC/T-type rectifier in wind turbine systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(2): 1012-1021.

作者简介

陈铭芸,2019 年于东北大学获得学士学位,现为武汉大学电气与自动化学院博士研究生,主要研究方向为电力电子变换器故障诊断与容错控制。

E-mail:mingyun. chen@ whu. edu. cn

Chen Mingyun received her B. Sc. degree from Northeastern University in 2019. Now she is a Ph. D. candidate at Wuhan University. Her main research interests include the fault diagnosis and fault-tolerant control of power converters.

何怡刚(通信作者),1992 年于西安交通大学获得博士学位,现为武汉大学教授,主要研究方向为混合信号电路故障诊断、电子设备可靠性和通信信道建模与监测等。

E-mail:yghe1221@ whu. edu. cn

He Yigang (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Xi′an Jiaotong University in 1992. Now he is a professor at Wuhan University. His main research interests include mixed-signal circuit fault diagnosis, electronic equipment reliability, and communication channel modeling and monitoring.