

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241648

# 基于自适应滑模观测器的级联 H 桥光伏逆变器 开路故障诊断方法

郑征<sup>1,2</sup>, 薄佳林<sup>1,2</sup>, 李斌<sup>1,2</sup>

(1. 河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454003; 2. 河南省智能装备直驱技术与控制  
国际联合实验室, 河南 焦作 454003)

**摘要:** 为实现级联 H 桥(cascaded H-bridge, CHB)光伏并网逆变器单管和双管开路故障诊断, 提出了一种基于自适应滑模观测器的开路故障诊断方法。首先基于 CHB 光伏逆变器混合逻辑动态(mixed logic dynamic, MLD)模型设计自适应滑模观测器, 并根据实际电流和估计电流设计故障检测变量。其次根据直流侧电容电压设计电压阈值进行故障模块定位。然后通过电流残差构造故障定位变量, 比较故障状态下自适应滑模观测器的电流残差变化以实现对角管的区分。最后设计前次故障状态下的自适应滑模观测器实现双管开路故障诊断。实验结果表明, 所提出的诊断方法可在一个基波周期内准确识别任意位置的单管和双管故障, 诊断速度快、鲁棒性强。

**关键词:** 级联 H 桥; 自适应滑模观测器; 电压阈值; 电流残差; 故障诊断

## Open-circuit fault diagnosis method for cascade H-bridge PV inverters based on adaptive sliding mode observer

ZHENG Zheng<sup>1,2</sup>, BO Jialin<sup>1,2</sup>, LI Bin<sup>1,2</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 2. Henan International  
Joint Laboratory of Direct Drive and Control of Intelligent Equipment, Jiaozuo 454003, China)

**Abstract:** To diagnose single- and double-switch open-circuit faults in cascaded H-bridge (CHB) photovoltaic (PV) grid-connected inverters, an open-circuit fault diagnosis method based on an adaptive sliding mode observer is proposed. First, an adaptive sliding mode observer is designed using the mixed logic dynamic (MLD) model of the CHB PV inverter, and fault detection variables are constructed based on actual and estimated currents. Second, voltage thresholds derived from the DC-side capacitor voltage are used for fault module localization. Then, fault localization variables are constructed from current residuals, and the variations of current residuals of the adaptive sliding mode observer under fault conditions are compared to distinguish diagonal switch faults. Finally, double-switch open-circuit fault diagnosis is realized by designing an adaptive sliding mode observer based on the previous fault state. Experiment results show that the proposed method can accurately identify single- and double-switch faults at any position within one fundamental cycle, with fast diagnosis speed and strong robustness.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U1804143).

**Key words:** cascaded H-bridge; adaptive sliding mode observer; voltage threshold; current residual; fault diagnosis

## 0 引言

级联 H 桥(cascaded H-bridge, CHB)多电平逆变

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(U1804143); 河南省重点研发专项资助(241111241700); 河南省国际科技合作项目资助(232102520017)

器因其具有效率高、谐波失真小、模块化扩展性强等优点<sup>[1]</sup>, 已广泛应用于中压光伏逆变系统、铁路牵引和静止同步补偿器等领域<sup>[2]</sup>。

根据一项调查显示, 开关管故障占变流器系统故障的 38%<sup>[3]</sup>, 开路故障和短路故障是开关管故障的主要故障类型。其中短路故障通常会造成破坏性危害<sup>[4]</sup>, 实际系统中一般配备有短路硬件保护功能<sup>[5]</sup>,

而带有监控与保护装置的驱动电路能够有效降低其破坏性影响<sup>[6]</sup>。键合线失效和栅极驱动器故障通常会导致开路故障,虽然开路故障不会立即造成损害,但可能导致电流失真,这会使得功率不平衡并进一步损害系统<sup>[7-8]</sup>,造成重大经济损失和安全事故。因此,实现开路故障检测和定位具有重要的意义。

目前,开关管开路故障诊断方法可以分为基于信号、基于数据驱动和基于模型 3 类诊断方法。基于信号的方法通过分析系统中采集到的信号特征进行故障检测、定位和诊断。文献[9]提出了一种用于 N 电平级联 H 桥多电平逆变器的新型广义开关开路故障诊断方法。在这种检测技术中,电桥电压的半周期平均值作为故障识别特征。文献[10]提出一种四状态主动故障诊断方法,该方法在检测到故障后,通过重新排列载波来执行容错操作;在特定的 4 种调制状态下,从电压信号中提取有效的故障特征,实现故障定位。然而,基于信号的方法易受未知输入和负载变化的影响。

基于数据驱动的方法通过对系统运行过程中产生的大量数据进行分析 and 建模,实现故障检测和诊断。常见方法有神经网络<sup>[11-12]</sup>、随机森林算法<sup>[13-14]</sup>、支持向量机<sup>[15-17]</sup>和机器学习<sup>[18]</sup>等。但基于数据驱动的方法需要对大量数据进行训练,计算成本和复杂度较高。

基于模型的方法主要通过构建系统的数学模型来描述其正常工作状态,并利用模型的残差进行故障检测、定位和诊断。常见的方法有 Luenberger 观测器、扰动观测器<sup>[19]</sup>、滑模观测器(sliding mode observer, SMO)<sup>[20-21]</sup>、状态估计器<sup>[22]</sup>等。文献[22]提出一种基于状态估计器的诊断方法,利用电流残差的变化率来实现故障诊断。基于模型的方法具有快速实时、可靠性高等优点。

但上述这些基于模型的方法处理系统不确定性和外部扰动的能力有限,而滑模观测器在处理这类不确定性和扰动时具有优越的性能。自适应滑模观测器结合了滑模控制与自适应控制策略,主要用于估计系统状态,尤其能为非线性系统提供精确的状态估计。因此结合自适应控制策略设计滑模观测器是近年来一个研究热点,如文献[23]利用自适应滑模观测器估计单相三电平整流器的网侧电流,通过设计故障诊断方法实现故障检测和定位,提高了高速列车牵引系统的稳定性和可靠性;文献[24]基于滑模趋近律设计了新的转速自适应估计环节,提高了电机的暂态运行能力。目前针对光伏并网系统中开路故障诊断策略的研究尚未有所应用。

根据上述分析,本文提出了一种基于自适应滑

模观测器的诊断方法。该方法首先设计了能够快速收敛并有效减轻振荡的自适应滑模观测器;在此基础上得到网侧电流残差和电流形态因子,然后对电流残差、电流形态因子及直流侧电容电压进行处理,从而实现故障定位。该方法可在一个基波周期内快速完成定位。

## 1 CHB 光伏并网逆变器混合逻辑动态模型

### 1.1 正常状态下的逆变器混合逻辑动态模型

图 1 为并网逆变器结构图,每相由  $n$  个 H 桥组成。图中:  $U_{PV}$  为直流侧电压;  $R$  为等效电阻;  $L$  为滤波电感;  $C$  为直流侧电容;  $e_a$ 、 $e_b$ 、 $e_c$  为电网电压;  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  为网侧电流;  $m$  为三相负载中性点;  $o$  为输出中性点; 每个 H 桥由 4 个开关管  $Q_{xij}$ 、4 个反并联二极管  $D_{xij}$  组成;  $x = a, b, c$ ;  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $j = 1, 2, 3, 4$ 。

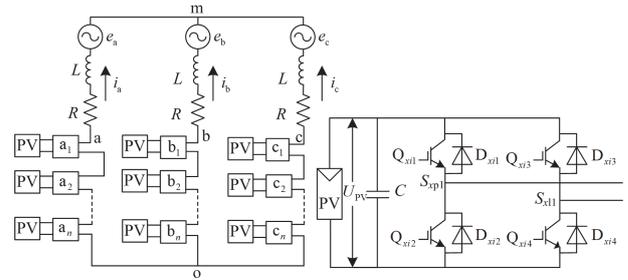


图 1 并网逆变器拓扑结构

Fig. 1 Topology of grid-connected inverter

由图 1 可得系统状态方程为

$$\begin{cases} u_{am} = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + e_a \\ u_{bm} = Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + e_b \\ u_{cm} = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + e_c \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $u_{am}$ 、 $u_{bm}$ 、 $u_{cm}$  为逆变器三相电压。

根据电路拓扑约束关系可得

$$\begin{cases} u_{am} = u_{ao} + u_{om} \\ u_{bm} = u_{bo} + u_{om} \\ u_{cm} = u_{co} + u_{om} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $u_{ao}$ 、 $u_{bo}$ 、 $u_{co}$  为级联 H 桥输出电压;  $u_{om}$  为共模电压。

由星形连接可知  $u_{am} + u_{bm} + u_{cm} = 0$ , 进一步可得

$$u_{om} = -\frac{1}{3}(u_{ao} + u_{bo} + u_{co}) \quad (3)$$

由式(2)、式(3)可得

$$\begin{bmatrix} u_{am} \\ u_{bm} \\ u_{cm} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{ao} \\ u_{bo} \\ u_{co} \end{bmatrix} \quad (4)$$

开关管的导通与关断受驱动信号的控制，二极管的导通与关断由其两端电压的正负极性控制。开关管和二极管的变化会导致 H 桥输出电压的变化，因此将开关管和二极管导通状态定义为桥臂开关函数  $S_{xpi}$  和  $S_{xli}$  (p 指左桥臂, l 指右桥臂),  $S_{xpi}$  和  $S_{xli}$  可表示为

$$\begin{cases} S_{xpi} = \begin{cases} 1, Q_{xi1} \text{ 或 } D_{xi1} \text{ 导通} \\ 0, Q_{xi2} \text{ 或 } D_{xi2} \text{ 导通} \end{cases} \\ S_{xli} = \begin{cases} 1, Q_{xi3} \text{ 或 } D_{xi3} \text{ 导通} \\ 0, Q_{xi4} \text{ 或 } D_{xi4} \text{ 导通} \end{cases} \end{cases} \quad i=1,2,\dots,n \quad (5)$$

定义每个 H 桥输出电压系数  $k_{xi}$  为

$$k_{xi} = S_{xpi} - S_{xli} \quad (6)$$

级联 H 桥输出电压为

$$\begin{cases} u_{ao} = \sum_{i=1}^n k_{ai} U_{PV} \\ u_{bo} = \sum_{i=1}^n k_{bi} U_{PV} \\ u_{co} = \sum_{i=1}^n k_{ci} U_{PV} \end{cases} \quad (7)$$

由式(4)和式(7)可得

$$\begin{bmatrix} u_{am} \\ u_{bm} \\ u_{cm} \end{bmatrix} = \frac{U_{PV}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_a \\ \sigma_b \\ \sigma_c \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中

$$\begin{cases} \sigma_a = \sum_{i=1}^n k_{ai} \\ \sigma_b = \sum_{i=1}^n k_{bi} \\ \sigma_c = \sum_{i=1}^n k_{ci} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\sigma_a$ 、 $\sigma_b$ 、 $\sigma_c$  为级联 H 桥输出电压系数。

对于任意模块, 当  $Q_{xi1} - Q_{xi4}$  的驱动信号  $\{s_{xi1} \ s_{xi2} \ s_{xi3} \ s_{xi4}\} = \{0 \ 0 \ 0 \ 1\}$  时, 电流流向如图 2 所示。当  $i_x > 0$  时(电流流出逆变电路), 电流流过  $Q_{xi4}$  和  $D_{xi2}$ ,  $\{S_{xpi} \ S_{xli}\} = \{0 \ 0\}$ ; 当  $i_x < 0$  时(电流流向逆变电路), 电流流过  $D_{xi1}$  和  $D_{xi4}$ ,  $\{S_{xpi} \ S_{xli}\} = \{1 \ 0\}$ ; 当  $i_x = 0$  时, 此时开关管中并无电流流过, 影响很小, 故不讨论这种情况。综合所有情况, 开关函数如表 1 所示。

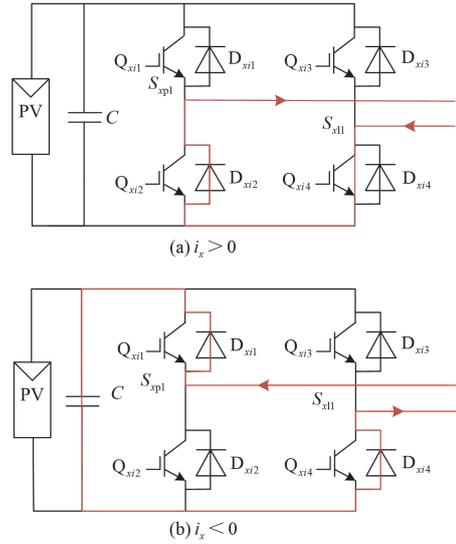


图 2 当  $s_{xi1} = 0$ 、 $s_{xi2} = 0$ 、 $s_{xi3} = 0$ 、 $s_{xi4} = 1$  时电流路径  
Fig. 2 Current paths when  $s_{xi1} = 0, s_{xi2} = 0, s_{xi3} = 0, s_{xi4} = 1$

表 1 不同条件下的桥臂开关函数

$s_{xi1}$	$s_{xi2}$	$s_{xi3}$	$s_{xi4}$	$S_{xpi}(i_x > 0)$	$S_{xpi}(i_x < 0)$	$S_{xli}(i_x > 0)$	$S_{xli}(i_x < 0)$
1	0	0	0	1	1	1	0
1	0	0	1	1	1	0	0
1	0	1	0	1	1	1	1
0	1	0	0	0	0	1	0
0	1	0	1	0	0	0	0
0	1	1	0	0	0	1	1
0	0	0	0	0	1	1	0
0	0	0	1	0	1	0	0
0	0	1	0	0	1	1	1

用逻辑变量  $\alpha$  描述网侧电流  $i_x$  的方向,  $\alpha = 1$  表示  $i_x$  大于 0(电流流出逆变电路),  $\alpha = 0$  表示  $i_x$  小于 0(电流流向逆变电路)。对表 1 进行逻辑运算, 得到桥臂开关函数的逻辑表达式为

$$\begin{cases} S_{xpi} = s_{xi1} \alpha + \bar{s}_{xi2} \bar{\alpha} \\ S_{xli} = s_{xi3} \bar{\alpha} + \bar{s}_{xi4} \alpha \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $\bar{\alpha}$  表示  $\alpha$  的逻辑“非”;  $\bar{s}_{xij}$  表示  $x$  相第  $i$  个模块开关管  $Q_{xij}$  驱动信号的逻辑“非”。

根据式(6)可得

$$k_{xi} = (s_{xi1} \alpha + \bar{s}_{xi2} \bar{\alpha}) - (s_{xi3} \bar{\alpha} + \bar{s}_{xi4} \alpha) \quad (11)$$

综上, 可得逆变器正常状态下的混合逻辑动态 (mixed logic dynamic, MLD) 模型为

$$\dot{i} = A i + B_1 \sigma + B_2 e \quad (12)$$

其中

$$i = [i_a \ i_b \ i_c]^T \quad \sigma = [\sigma_a \ \sigma_b \ \sigma_c]^T$$

$$e = [e_a \quad e_b \quad e_c]^T \quad A = \text{diag}\left(-\frac{R}{L}, -\frac{R}{L}, -\frac{R}{L}\right)$$

$$B_1 = \frac{U_{PV}}{3L} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad B_2 = \text{diag}\left(-\frac{1}{L}, -\frac{1}{L}, -\frac{1}{L}\right)$$

同时, 式(12)可以写为

$$\dot{\mathbf{i}} = \mathbf{A}\mathbf{i} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (13)$$

式中:  $\mathbf{B}$  为三阶单位矩阵;  $\mathbf{u} = \mathbf{B}_1\boldsymbol{\sigma} + \mathbf{B}_2\mathbf{e}$ 。

## 1.2 故障状态下的逆变器混合逻辑动态模型

针对逆变器开关管  $Q_{ai1}$  发生开路故障的工况, 分析其电流的流通过程,  $Q_{ai1}$  开路故障时的开关函数如表 2 所示。

表 2  $Q_{ai1}$  开路故障时的桥臂开关函数

Table 2 Bridge arm switching function of  $Q_{ai1}$  open-circuit fault

$s_{x1}$	$s_{x2}$	$s_{x3}$	$s_{x4}$	$S_{xpi}(i_x > 0)$	$S_{xpi}(i_x < 0)$	$S_{xai}(i_x > 0)$	$S_{xai}(i_x < 0)$
0	1	0	0	0	0	1	0
0	1	0	1	0	0	0	0
0	1	1	0	0	0	1	1
0	0	0	0	0	1	1	0
0	0	0	1	0	1	0	0
0	0	1	0	0	1	1	1

对表 2 进行逻辑运算, 可推导出  $Q_{ai1}$  开关管开路故障状态下 a 相第  $i$  个 H 桥输出电压系数  $k'_{ai1}$  的表达式为

$$k'_{ai1} = \bar{\alpha}(\bar{s}_{ai2} - s_{ai3}) - \alpha\bar{s}_{ai4} \quad (14)$$

同理, 可推导出开关管  $Q_{ai2}$ 、 $Q_{ai3}$ 、 $Q_{ai4}$  开路故障下的电压系数  $k'_{ai2}$ 、 $k'_{ai3}$ 、 $k'_{ai4}$  分别为

$$\begin{cases} k'_{ai2} = \alpha(s_{ai1} - \bar{s}_{ai4}) + \bar{\alpha}\bar{s}_{ai3} \\ k'_{ai3} = \alpha(s_{ai1} - \bar{s}_{ai4}) + \bar{\alpha}\bar{s}_{ai2} \\ k'_{ai4} = \bar{\alpha}(\bar{s}_{ai2} - s_{ai3}) - \alpha\bar{s}_{ai1} \end{cases} \quad (15)$$

由式(7)和式(12)可得故障状态下的 MLD 模型为

$$\dot{\mathbf{i}}' = \mathbf{A}\mathbf{i}' + \mathbf{B}_1\boldsymbol{\sigma}'_{xij} + \mathbf{B}_2\mathbf{e} \quad (16)$$

式中:  $\mathbf{i}'$  为故障状态下的输出电流;  $\boldsymbol{\sigma}'$  为故障状态下的级联 H 桥的电压系数矩阵。

## 2 故障诊断策略

### 2.1 自适应滑模观测器设计

考虑到实际工况中噪声等未知干扰, 式(12)的 MLD 模型可表示为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{i}} = \mathbf{A}\mathbf{i} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{D}\boldsymbol{\delta} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{i} \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $\mathbf{y}$  为输出变量;  $\boldsymbol{\delta}$  为有界未知扰动;  $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{D}$  为三阶单位矩阵。

因此, 设计的自适应滑模观测器为

$$\begin{cases} \dot{\hat{\mathbf{i}}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{i}} + \mathbf{B}\mathbf{u} + f(S) \\ \hat{\mathbf{y}} = \mathbf{C}\hat{\mathbf{i}} \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $\hat{\mathbf{i}}$  为输出电流  $\mathbf{i}$  的估计值;  $f(S)$  为自适应趋近律;  $S$  为选取的滑模面,  $S = \mathbf{y} - \mathbf{C}\hat{\mathbf{i}}$ 。

$$f(S) = \frac{K}{N(S)}\text{sign}(S), K > 0 \quad (19)$$

式中:  $N(S) = \zeta + (1 - \zeta)e^{-|S|}$ ,  $0 < \zeta < 1$ ;  $K$  为观测器增益。

为证明所设计滑模观测器的稳定性, 设计 Lyapunov 函数为

$$V = \frac{1}{2}\mathbf{R}^T(t)\mathbf{R}(t) = \frac{1}{2}\tilde{\mathbf{i}}_x^2 \quad (20)$$

式中:  $\mathbf{R}(t) = \tilde{\mathbf{i}}_x = \mathbf{i}_x - \hat{\mathbf{i}}_x$ ,  $\tilde{\mathbf{i}}_x$  为电流残差。

对式(20)求导可得

$$\dot{V} = \mathbf{R}^T(t)\dot{\mathbf{R}}(t) = \tilde{\mathbf{i}}_x\dot{\tilde{\mathbf{i}}}_x \quad (21)$$

为了证明 Lyapunov 函数的导数为负数, 将式(17)和式(18)相减, 得到系统状态方程为

$$\dot{\tilde{\mathbf{i}}}_x = \mathbf{A}\tilde{\mathbf{i}}_x + \mathbf{D}\boldsymbol{\delta} - f(S) \quad (22)$$

将式(22)代入式(21)中可得

$$\dot{V}(t) = \mathbf{R}^T(t)\dot{\mathbf{R}}(t) = \mathbf{A}\tilde{\mathbf{i}}_x^2 + \tilde{\mathbf{i}}_x\mathbf{D}\boldsymbol{\delta} - \tilde{\mathbf{i}}_x f(S) \quad (23)$$

当观测器增益  $K$  的值大于有界未知扰动时, 有

$$\dot{V}(t) < 0 \quad (24)$$

表明本文所设计的观测器是稳定的。

本文所提故障诊断方法的诊断原理如图 3 所示。根据故障状态下估计电流与实际电流及二者的残差, 设计故障诊断方法进行故障检测和故障定位。

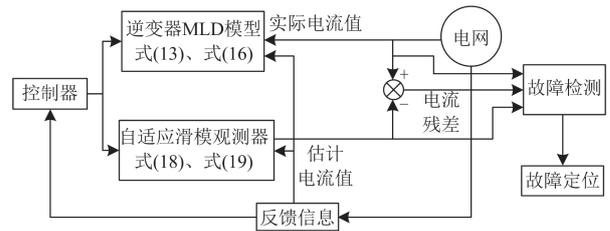


图 3 故障诊断原理

Fig. 3 Principle of fault diagnosis

### 2.2 故障检测方法

本节利用逆变器实际电流和估计电流来设计故障检测方法, 实现了逆变器开路故障的准确检测。

在故障情况下, 逆变器实际电流会出现畸变。因此, 本文基于电流形态因子设计故障检测特征量  $M_x$  和自适应阈值  $T_x$  分别为

$$M_x = \frac{\log_3(1 + \varphi_x)}{\varphi_x} \quad (25)$$

$$T_x = \frac{\log_3(1 + |\hat{\varphi}_x - \varphi_x|)}{|\hat{\varphi}_x - \varphi_x|} \quad (26)$$

式中:  $\varphi_x = 3^{|i_x|_{\text{RMS}}}$ 、 $\hat{\varphi}_x = 3^{|\hat{i}_x|_{\text{RMS}}}$  为构建的电流形态因子,  $|i_x|_{\text{RMS}}$  为电流  $|i_x|$  的方均根。当 CHB 并网逆变器正常工作时,  $\varphi_x > 0$ ,  $\hat{\varphi}_x - \varphi_x = 0$ , 这会使  $M_x < T_x$ 。当 CHB 并网逆变器发生故障时, 故障相输出电流正半周期会减小, 这会使  $\varphi_x$  减小,  $|\hat{\varphi}_x - \varphi_x|$  增大, 使得  $M_x > T_x$ , 由此实现 CHB 逆变器故障相检测。

为了增强检测的鲁棒性, 避免误报和漏报, 减小误诊率, 设计故障检测变量  $\eta_x$  为

$$\eta_x = \int_0^t |\hat{\varphi}_x - \varphi_x| dt \quad (27)$$

综上所述, 构造故障检测变量  $D_x$  为

$$D_x = \begin{cases} 1 & M_x > T_x \text{ 且 } \{\eta_x = \max\{\eta_a, \eta_b, \eta_c\}\} \\ 0 & M_x < T_x \text{ 或 } \{\eta_x \neq \max\{\eta_a, \eta_b, \eta_c\}\} \end{cases} \quad (28)$$

### 2.3 单管开路故障诊断方法

本节根据不同开关管开路故障的特性, 设计了开关管开路故障定位方法, 实现逆变器开关管开路故障定位。

当  $Q_{x1}$  或  $Q_{x4}$  发生开路故障时, 故障相输出电流正半周期会减小, 使得电流残差大于 0。当  $Q_{x2}$  或  $Q_{x3}$  发生开路故障时, 故障相输出电流负半周期会增大, 使得电流残差小于 0。

根据电流残差, 构造故障定位变量  $P_x$  为

$$P_x = \frac{\text{sign}(\hat{i}_x - i_x)}{2} + \text{sign}(|i_x| - \zeta) \quad (29)$$

考虑到未知扰动的影响, 令扰动  $\zeta = 0.5$ 。由式(30)可知, 当  $Q_{x1}$  或  $Q_{x4}$  发生开路故障时,  $P_x = 3/2$ , 当  $Q_{x2}$  或  $Q_{x3}$  发生开路故障时,  $P_x = 1/2$ 。由于故障定位变量  $P_x$  无法准确识别对角管, 本节提出了新的方法来识别对角管。

为了准确识别对角管, 将正常状态下自适应滑模观测器中的开关函数替换为故障后开关函数, 设计故障状态下的自适应滑模观测器。最后, 根据故障后自适应滑模观测器中的电流残差进行更准确的定位。

以 a 相为例, 由式(17)可得无故障时网侧电流的微分方程为

$$\dot{i}_a = A_1 i_a + B_3 u_a + \delta \quad (30)$$

式中:  $A_1 = -R/L$ ;  $B_3 = -1/L$ 。

由式(18)得到无故障时网侧电流观测值的微分方程为

$$\dot{\hat{i}}_a = A_1 \hat{i}_a + B_3 u_a + f(S) \quad (31)$$

由式(30)和式(31)可得电流残差  $\tilde{i}_a$  的微分方程为

$$\dot{\tilde{i}}_a = A_1 \tilde{i}_a - f(S) + \delta \quad (32)$$

由 2.1 节可知, 本文设计的自适应滑模观测器是稳定的, 可推导出  $\lim_{t \rightarrow \infty} \hat{i}(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} i(t)$ , 代入式(32)可知  $\lim_{t \rightarrow \infty} \delta - f(S)$  趋近于 0 且  $\delta - f(S)$  为有界量, 因此可在计算中将其略去。

由式(30)和式(31)可知, 当  $Q_{a1}$  开路故障时网侧电流和网侧电流观测值的微分方程为

$$\begin{cases} \dot{i}_{a1} = A_1 i_{a1} + B_3 u_{a1} + \delta \\ \dot{\hat{i}}_a = A_1 \hat{i}_a + B_3 u_a + f(S) \end{cases} \quad (33)$$

式中:  $i_{a1}$  表示 a 相第  $i$  个模块开关管  $Q_{a1}$  开路故障时的网侧电流;  $u_{a1}$  表示 a 相第  $i$  个模块开关管  $Q_{a1}$  开路故障时的电压。

此时电流残差的微分方程为

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{i}}_a &= A_1 \tilde{i}_a + B_3 (u_{a1} - u_a) - f(S) + \delta = \\ & - \frac{R}{L} \tilde{i}_a - \frac{U_{\text{PV}}}{3L} (k'_{a1} - k_{a1}) - f(S) + \delta \end{aligned} \quad (34)$$

由前文可知  $\delta - f(S)$  趋近于 0, 由式(34)可求解得到

$$\tilde{i}_a(t) = e^{-\frac{R}{L}(t-t_0)} \tilde{i}_a(t_0) - \frac{(k'_{a1} - k_{a1})}{R} \left[ 1 - e^{-\frac{RU_{\text{PV}}}{3L}(t-t_0)} \right] \quad (35)$$

式中:  $t_0$  为每次开关状态变化后的初始时刻。

本文中并网逆变器开关频率为 2 kHz, 开关周期为 0.5 ms。在该开关周期下,  $e^{-Rt/L}$  与  $1 - Rt/L$  近似相等。并且考虑一个开关周期内,  $R(t-t_0)/L \ll 1$ , 式(35)可写为

$$\tilde{i}_a(t) = \tilde{i}_a(t_0) - \frac{U_{\text{PV}}(k'_{a1} - k_{a1})}{3L} (t - t_0) \quad (36)$$

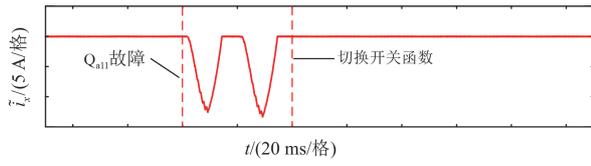
式(36)是电流残差在一个开关状态下的简化时域表达式。

当  $Q_{a1}$  发生开路故障时, 将自适应滑模观测器输入的  $\sigma_a$  切换为  $\sigma'_{a1}$ , 其网侧电流和网侧电流观测值的微分方程为

$$\begin{cases} \dot{i}_{a1} = A_1 i_{a1} + B_3 u_{a1} + \delta \\ \dot{\hat{i}}_a = A_1 \hat{i}_a + B_3 u_{a1} + f(S) \end{cases} \quad (37)$$

其电流残差  $\tilde{i}_a(t) = \tilde{i}_a(t_0)$ , 残差在故障前后几乎不变化。以  $Q_{a1}$  为例, 电流残差变化如图 4 所示。

当  $Q_{a4}$  发生开路故障时, 将自适应滑模观测器

图 4  $Q_{ai1}$  开路故障后残差的变化Fig. 4 Change of residual after  $Q_{ai1}$  open-circuit fault

输入的  $\sigma_a$  也切换为  $\sigma'_{ai1}$ , 其网侧电流和网侧电流观测值的微分方程为

$$\begin{cases} \dot{i}_{ai4} = A_1 i_{ai4} + B_3 u_{ai4} + \delta \\ \dot{\hat{i}}_{ai1} = A_1 \hat{i}_{ai1} + B_3 u_{ai1} + f(S) \end{cases} \quad (38)$$

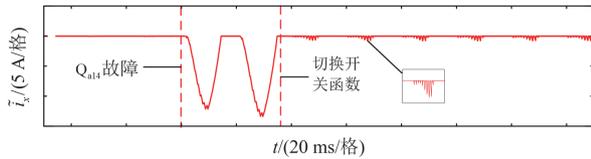
式中:  $i_{ai4}$  表示为 a 相第  $i$  个模块开关管  $Q_{ai4}$  开路故障时的网侧电流;  $u_{ai4}$  表示为 a 相第  $i$  个模块开关管  $Q_{ai4}$  开路故障时的电压。

其电流残差为

$$\begin{aligned} \tilde{i}_a(t) &= \tilde{i}_a(t_0) - \frac{U_{PV}(\sigma'_{ai4} - \sigma'_{ai1})}{3L}(t - t_0) = \\ &\tilde{i}_a(t_0) + \frac{\alpha U_{PV}(\bar{s}_{ai1} - \bar{s}_{ai4})}{3L}(t - t_0) \end{aligned} \quad (39)$$

式中:  $\sigma'_{ai1}$  表示为 a 相第  $i$  个模块开关管  $Q_{ai1}$  开路故障时的级联 H 桥电压系数。

由式(40)可知, 当网侧电流流出逆变电路 ( $\alpha=1$ )、 $\bar{s}_{ai1} - \bar{s}_{ai4} = -1$  时, 残差以  $-U_{PV}/3L$  的速率减小。以  $Q_{ai4}$  为例, 电流残差变化如图 5 所示。同理,  $Q_{xi2}$  或  $Q_{xi3}$  的具体定位也可依照上文进行确定。

图 5  $Q_{ai4}$  开路故障后残差的变化Fig. 5 Change of residual after  $Q_{ai4}$  open-circuit fault

综上所述, 本文提出的 CHB 光伏并网逆变器单开关管故障诊断策略可表示为

$$Q_{xij} = \begin{cases} Q_{xi1} & D_x = 1 \text{ 且 } P_x = \frac{3}{2} \text{ 且 } \tilde{i}_x = 0 \\ Q_{xi2} & D_x = 1 \text{ 且 } P_x = \frac{1}{2} \text{ 且 } \tilde{i}_x = 0 \\ Q_{xi3} & D_x = 1 \text{ 且 } P_x = \frac{1}{2} \text{ 且 } \tilde{i}_x > 0 \\ Q_{xi4} & D_x = 1 \text{ 且 } P_x = \frac{3}{2} \text{ 且 } \tilde{i}_x < 0 \end{cases} \quad (40)$$

## 2.4 双管开路故障诊断方法

在实现单个开关管开路故障检测的基础上, 进

一步探讨了双管开路故障的诊断策略。在完成前次开关管开路故障的检测和定位之后, 设计故障后自适应滑模观测器。利用该观测器对故障电流进行估计, 并计算故障检测和定位变量, 实现第二个开关管开路故障诊断。然而, 由于双管故障对电流残差的影响极为显著, 这使得难以精确定位第二个开关管的具体位置。

因此, CHB 并网逆变器第二个开关管开路故障的诊断策略为

$$Q_{xij} = \begin{cases} Q_{xi1} \text{ 或 } Q_{xi4} & D_x = 1 \text{ 且 } P_x = \frac{3}{2} \\ Q_{xi2} \text{ 或 } Q_{xi3} & D_x = 1 \text{ 且 } P_x = \frac{1}{2} \end{cases} \quad (41)$$

## 2.5 故障模块定位

当 CHB 逆变器中的开关管处于正常工作状态时, 电容电压有两种情况: 当  $i_x$  较小时, 光伏电源对电容充电, 此时电容电压上升; 当  $i_x$  较大时, 电容对外放电, 电容电压下降。但当开关管发生故障时, 光伏电源继续向电容充电, 电容电压上升。

本节提出一种故障模块定位方法, 当检测到故障时, 提高故障相直流侧电容电压的采样率, 通过判断电容电压的变化趋势来定位故障。当任意模块的直流侧电容电压超过阈值时, 则该模块可判断为故障模块。

模块电容电压  $U_{dcpv-xi}$  用于定位故障模块, 由于故障发生后故障模块直流侧电压会升高, 因此将电压阈值  $U_{dcpvth}$  设置为

$$U_{dcpvth} = U_{dcpv-avg} + k_1 \sqrt{\frac{v_{g-amp} i_d^*}{2NCW}} \quad (42)$$

式中:  $U_{dcpv-avg}$  为一个周期内各子模块的平均电容电压;  $v_{g-amp}$  为电网电压幅值;  $i_d^*$  为给定电流;  $N$  为模块数;  $W$  为电网电压角速度;  $k_1$  为比例系数。如果满足式(43)所示关系, 则判定模块出现故障。

$$U_{dcpv-xi} > U_{dcpv-avg} + k_1 \sqrt{\frac{v_{g-amp} i_d^*}{2NCW}} \quad (43)$$

故障模块定位方法如图 6 所示, 其中 a 相中模块 1 出现开关管开路故障, 其他模块无故障, 在 a 相

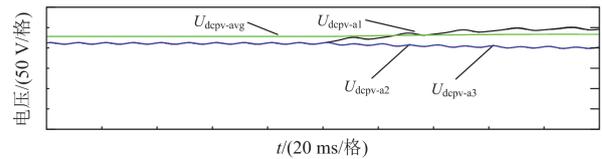


图 6 基于电容电压的故障模块定位方法

Fig. 6 Faulty module location method based on capacitor voltage

模块 1 发生开路故障后, 其直流侧电压会超过电压阈值, 其他模块的直流侧电压小于电压阈值。通过该方法可以判断出故障模块。

综上所述, 本文所提出的故障诊断流程如图 7 所示。

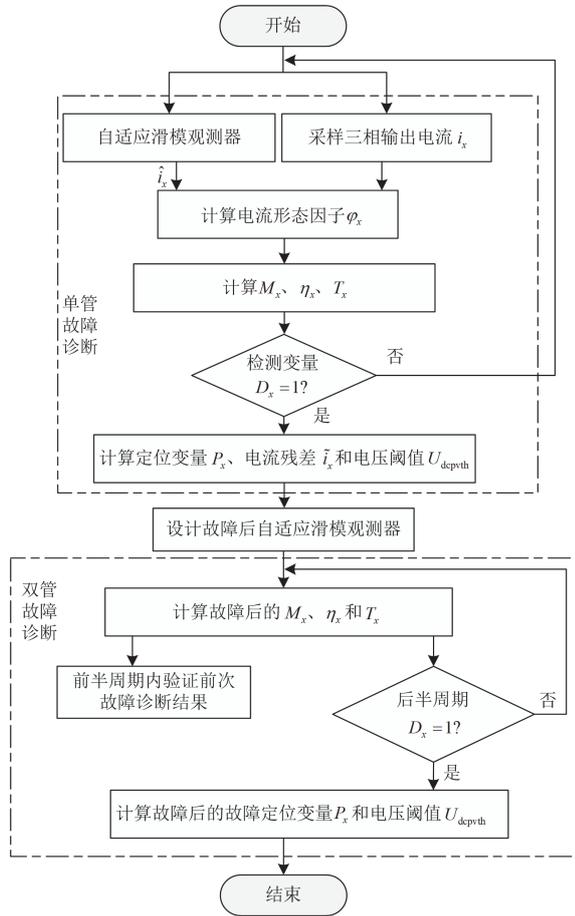


图 7 故障诊断流程

Fig. 7 Process of fault diagnosis

### 3 实验验证

为验证本文所提方法, 基于 DSP(TMS320F28335) 和 dSPACE-MicroLabBox 搭建半实物平台进行硬件在环仿真实验, 如图 8 所示。实验平台包括上位机、dSPACE、DSP 控制器、示波器以及 I/O 板卡等。在 dSPACE 平台中搭建 CHB 并网逆变器主电路模型, DSP 模拟控制电路完成对控制信号和反馈信号的交互, 通过 I/O 板卡处理输出信号。其中, CHB 光伏并网逆变器主要参数如表 3 所示。

#### 3.1 单管开路故障诊断

图 9 给出了  $Q_{a11}$  发生开路故障的诊断结果。由图 9 可知, 故障发生后故障检测特征量  $M_a$  超过阈值  $T_a$ , 检测变量  $\eta_a > \eta_b$ 、 $\eta_a > \eta_c$ , 定位变量  $P_a = 3/2$ ,

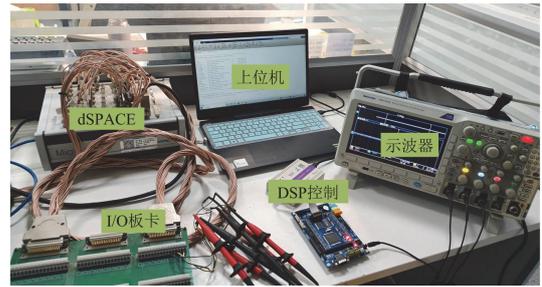


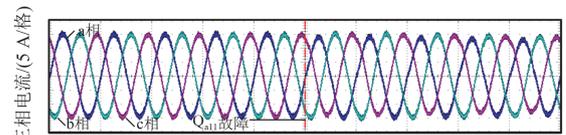
图 8 半实物仿真平台

Fig. 8 Semi-physical simulation platform

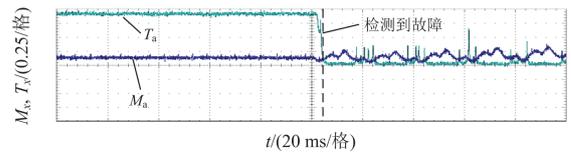
表 3 级联 H 桥光伏并网逆变器主要参数

Table 3 Main parameters of cascade H-bridge photovoltaic grid-connected inverter

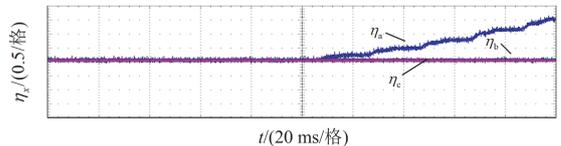
参数	数值
每相 H 桥单元数量	3
直流侧电压 $U_{pv}/V$	211
电网电压 $e_x/V$	220
网侧功率因数	1
直流侧电容 $C/mF$	4
滤波电感 $L/mH$	10
等效电阻 $R/\Omega$	0.3
开关频率 $f/kHz$	2
自适应滑模观测器增益 $K$	1500
比例系数 $k_1$	0.2



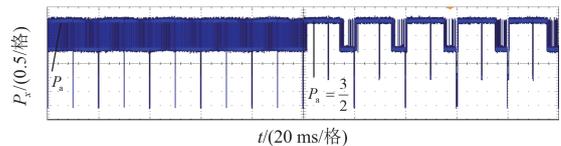
(a) 三相电流



(b) 检测特征量  $M_x$ 、自适应阈值  $T_x$



(c) 检测变量  $\eta_x$



(d) 定位变量  $P_x$

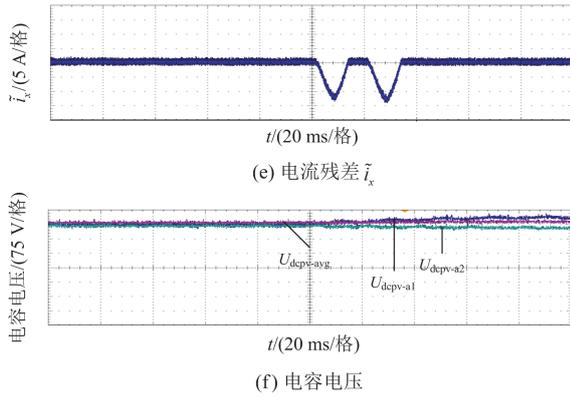


图 9 开关管  $Q_{a11}$  开路故障  
Fig. 9 Open-circuit fault of the switch  $Q_{a11}$

切换  $Q_{a11}$  故障后级联 H 桥电压系数的残差几乎为 0, 模块 1 电容电压  $U_{dcpv-a1}$  在故障后迅速超过电压阈值  $U_{dcpvth}$  (由于实验平台的 I/O 端口只有 3 个, 不能完全显示 3 个电容电压和 1 个电压阈值, 但未显示的电容电压符合仿真规律), 可推导出开关管  $Q_{a11}$  发生开路故障。

### 3.2 双管开路故障诊断

图 10 给出了  $Q_{a11}$  和  $Q_{a13}$  发生开路故障的诊断结果。由图 10 可知, 当  $Q_{a11}$  发生开路故障后, 故障检测特征量  $M_a$  超过自适应阈值  $T_a$ , 检测变量  $\eta_a > \eta_b$ 、 $\eta_a > \eta_c$ , 定位变量  $P_a = 3/2$ , 结合单管诊断中的残差变化与电压阈值, 可定位发生开路故障的开关管  $Q_{a11}$ 。此时级联 H 桥电压系数由  $\sigma_a$  切换为  $\sigma'_{a11}$ , 构造了  $Q_{a11}$  开路故障状态下的自适应滑模观

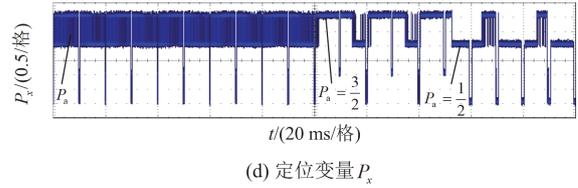
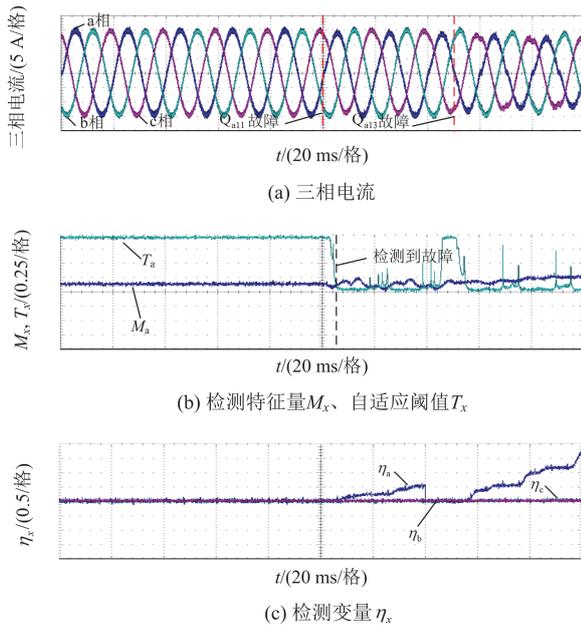


图 10 开关管  $Q_{a11}$  和  $Q_{a13}$  开路故障

Fig. 10 Open-circuit fault of the switch  $Q_{a11}$  and  $Q_{a13}$

测器。当  $Q_{a13}$  发生开路故障后, 故障检测特征量  $M_a$  超过自适应阈值  $T_a$ , 检测变量  $\eta_a > \eta_b$ 、 $\eta_a > \eta_c$ , 定位变量  $P_a = 1/2$ , 这表明  $Q_{a13}$  发生开路故障。

图 11 给出了  $Q_{a11}$  和  $Q_{a21}$  开路故障的诊断结果。由图 11 可知, 当  $Q_{a11}$  发生开路故障后, 故障检测特征量  $M_a$  超过自适应阈值  $T_a$ , 检测变量  $\eta_a > \eta_b$ 、 $\eta_a > \eta_c$ , 定位变量  $P_a = 3/2$ , 同时结合单管诊断中的残差变化和电压阈值, 可准确定位发生开路故障的开关管  $Q_{a11}$ 。此时级联 H 桥电压系数由  $\sigma_a$  切换为  $\sigma'_{a11}$ , 构造  $Q_{a11}$  开路故障状态下的自适应滑模观测器。当  $Q_{a21}$  发生开路故障后, 故障检测特征量  $M_a$  超过自适应阈值  $T_a$ , 检测变量  $\eta_a > \eta_b$ 、 $\eta_a > \eta_c$ , 定位变量  $P_a = 3/2$ , 这表明  $Q_{a21}$  发生开路故障。

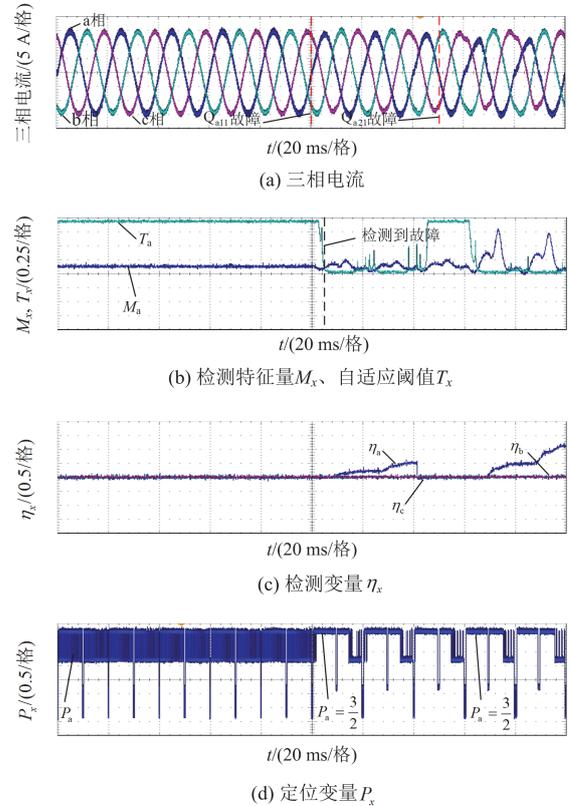


图 11 开关管  $Q_{a11}$  和  $Q_{a21}$  开路故障

Fig. 11 Open-circuit fault of the switch  $Q_{a11}$  and  $Q_{a21}$

图 12 给出了  $Q_{a11}$  和  $Q_{b11}$  开路故障的诊断结果。由图 12 可知, 当  $Q_{a11}$  发生开路故障后, 故障检测特征量  $M_a$  超过自适应阈值  $T_a$ , 检测变量  $\eta_a > \eta_b$ 、 $\eta_a > \eta_c$ , 故障定位变量  $P_a = 3/2$ 。同时, 结合单管诊断中的残差变化和电压阈值, 可定位到  $Q_{a11}$  发生开路故障。此时级联 H 桥电压系数由  $\sigma_a$  切换为  $\sigma'_{a11}$ , 构造了  $Q_{a11}$  开路故障状态下的自适应滑模观测器。在  $Q_{b11}$  发生开路故障后, 故障检测特征量  $M_b$

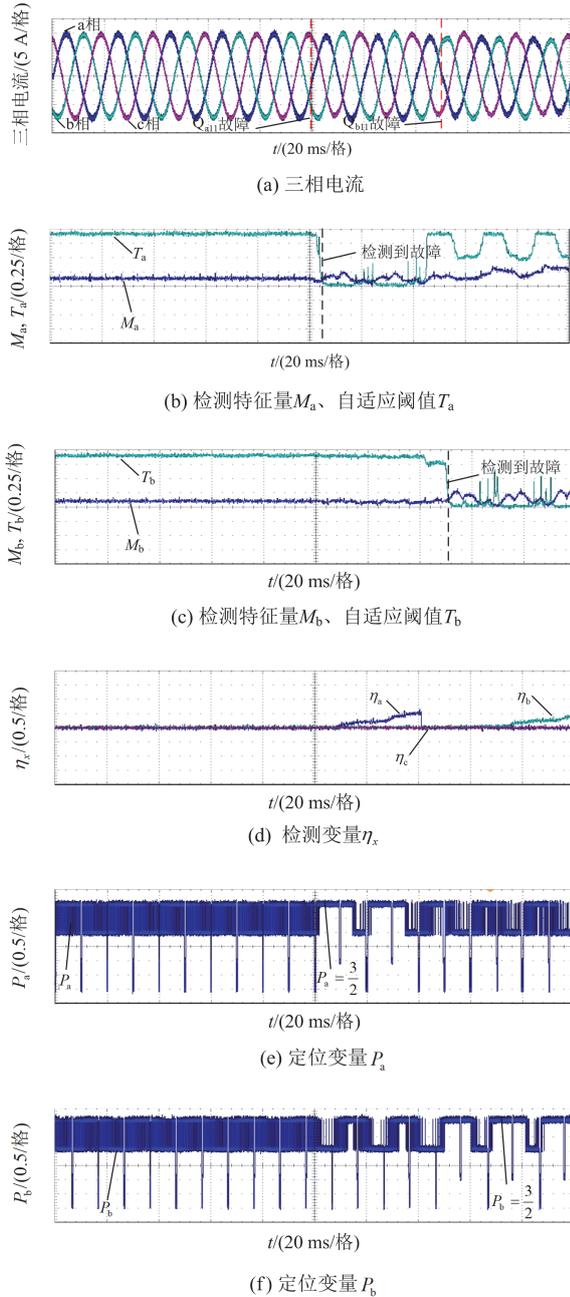


图 12 开关管  $Q_{a11}$  和  $Q_{b11}$  开路故障  
Fig. 12 Open-circuit fault of the switch  $Q_{a11}$  and  $Q_{b11}$

超过自适应阈值  $T_b$ , 检测变量  $\eta_b > \eta_a$ 、 $\eta_b > \eta_c$ , 定位变量  $P_b = 3/2$ , 这表明  $Q_{b11}$  发生开路故障。

## 4 方法对比分析

### 4.1 观测器对比分析

模型法的核心是对实际电流作出准确的估计, 为了凸显本文所提自适应滑模观测器的性能优势, 与文献[25]中的传统滑模观测器和文献[26]中的改进滑模观测器进行比较, 可以看出本文所提自适应滑模观测器的收敛速度明显快于其他两种, 且抑制抖振的性能也较强。对比结果如图 13、图 14 所示。

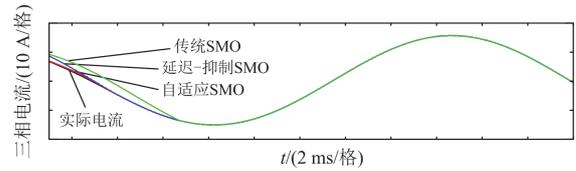


图 13 观测器估计值

Fig. 13 Observer estimates

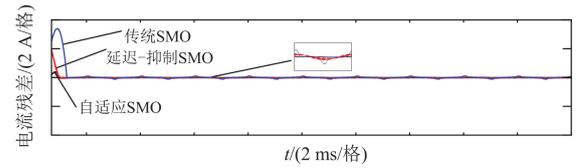


图 14 观测器误差

Fig. 14 Observer error

### 4.2 诊断方法对比分析

与文献[15-16,27-30]中诊断方法的对比结果如表 4 所示。文献[15]采用经验模态分解-多尺度排列熵对 IGBT 管电压进行处理, 然后采用支持向量机 (support vector machine, SVM) 进行故障诊断, 其故障检测时间大于 26 ms。文献[16]提出的主成分分析

表 4 多种方法对比

Table 4 Comparison of multiple methods

诊断方法	拓扑结构	方法	额外硬件	诊断时间/ms	复杂程度
文献[15]	五电平 H 桥	SVM	无	>26	高
文献[16]	级联 H 桥	PCA	无	>20	高
文献[27]	MMC	模型预测	无	>20	低
文献[28]	MMC	SMO	无	50	低
文献[29]	级联 H 桥	载波顶端信号	有	<5	中
文献[30]	级联 H 桥	改进电流调节器	无	20	低
本文	级联 H 桥	自适应滑模观测器	无	<15	低

(principle component analysis, PCA)和多类相关向量机故障诊断方法的故障检测时间最短为 20 ms, 该方法的缺点是需要大量的数据。文献[27]通过比较模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)中电容器电压的数学模型观测值与采样实际值, 即可定位发生故障的开关, 故障检测时间大于 20 ms。文献[28]采用滑模观测器(sliding mode observer, SMO)观测模块化多电平变换器的循环电流实现故障检测, 故障检测时间过长。文献[29]通过在载波的顶端或底端采样每个 H 桥模块的输出电压实现故障诊断, 虽检测时间较短, 但需要增加额外的传感器。文献[30]提出的改进电流调节器法的故障检测时间为 20 ms。

与上述方法相比, 本文在不需要传感器的情况下大大降低了诊断时间, 所使用的自适应滑模观测器具有更强的鲁棒性, 在面对并网系统波动时, 该方法仍能实现快速、准确的故障诊断。

## 5 结论

本文提出了基于自适应滑模观测器的诊断方法, 可以实现级联 H 桥逆变器单管和双管故障诊断, 实验结果证明了该方法的有效性, 得到结论如下。

1) 本文设计的自适应滑模观测器可以抑制抖动且收敛速度快, 能准确估计网侧电流, 并利用故障后自适应滑模观测器的残差变化实现单管和双管故障诊断。

2) 利用自适应滑模观测器可在一个基波电流周期内完成故障诊断, 该诊断方法也可以在其他拓扑中使用。

## 参考文献

- [1] 陶海军, 张晨杰, 赵蒙恩, 等. 级联 H 桥整流器谐波分析及混合控制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(22): 24-33.  
TAO Haijun, ZHANG Chenjie, ZHAO Meng'en, et al. Harmonic analysis and hybrid control of a cascaded H-bridge rectifier[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(22): 24-33.
- [2] XIE Dong, WANG Huai, GE Xinglai, et al. A voltage-based multiple fault diagnosis approach for cascaded H-bridge multilevel converters[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 10(5): 5092-5106.
- [3] LU Bin, SHARMA S K. A literature review of IGBT fault diagnostic and protection methods for power inverters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(5): 1770-1777.
- [4] CHOI U M, BLAABJERG F, LEE K B. Study and handling methods of power IGBT module failures in power electronic converter systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 30(5): 2517-2533.
- [5] SHAO Shuai, YU Naipeng, XU Xiaopeng, et al. Tunnel magnetoresistance-based short-circuit and over-current protection for IGBT module[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(10): 10930-10944.
- [6] CHOKHAWALA R S, CATT J, KIRALY L. A discussion on IGBT short-circuit behavior and fault protection schemes[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1995, 31(2): 256-263.
- [7] WANG Hanyu, WU Jiawei, MA Mingyao, et al. A model-based power switch fault diagnosis strategy for cascaded H-bridge converter[J]. Microelectronics Reliability, 2023, 150.
- [8] RAJ N, ANAND A, JAGADANAND G, et al. Output voltage modeling of cascaded H-bridge multilevel inverters under open-transistor fault[C]// 2016 IEEE Industrial Electronics and Applications Conference (IEACon), November 20-22, 2016, Kota Kinabalu, Malaysia: 7-11.
- [9] ANAND A, RAJ N, JAGADANAND G, et al. A generalized switch fault diagnosis for cascaded H-bridge multilevel inverters using mean voltage prediction[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 56(2): 1563-1574.
- [10] TANG Yunjie, WANG Tianzhen, ZHANG Fan, et al. Four-state active fault diagnosis method for cascaded H-bridge multilevel inverter[J]. Measurement, 2023, 213.
- [11] ARIF M N, DIN Z U, HAQ A U L, et al. Open switch fault diagnosis of cascaded H-bridge 5-level inverter using deep learning[J]. Frontiers in Energy Research, 2024, 12.
- [12] 马向南, 杨涛, 王云龙, 等. 基于轻量化神经网络及模型压缩的变压器油色谱故障诊断方法[J]. 供用电, 2023, 40(5): 84-91.  
MA Xiangnan, YANG Tao, WANG Yunlong, et al. Transformer dissolved gas fault diagnosis method based on lightweight neural network and model quantization[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(5): 84-91.
- [13] 王雷, 楚明月, 王晓华, 等. 基于随机森林的智能变电站一次侧设备运行状态监测方法研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(7): 184-190.  
WANG Lei, CHU Mingyue, WANG Xiaohua, et al. Research on monitoring method of primary equipment operation state in intelligent substation based on random forest[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(7): 184-190.
- [14] 江永鑫, 陈丽安, 郭梦倩, 等. 基于改进 CEEMD 和 RF 的低压串联故障电弧识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(1): 97-108.  
JIANG Yongxin, CHEN Li'an, GUO Mengqian, et al. Identification method of low voltage series fault arc based on improved CEEMD decomposition and RF[J]. Power System

- Protection and Control, 2024, 52(1): 97-108.
- [15] YANG Weiman, WANG Weinian, WANG Xinggui, et al. Fault diagnosis method of cascaded H-Bridge inverter based on EEMD-MPE[C]// International Conference on Wireless Power Transfer, December 2, 2022, Singapore, Singapore: 938-950.
- [16] WANG Tianzhen, XU Hao, HAN Jingang, et al. Cascaded H-bridge multilevel inverter system fault diagnosis using a PCA and multiclass relevance vector machine approach[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(12): 7006-7018.
- [17] 王海亮, 王兴贵, 李锦键, 等. 基于改进支持向量机的 MMC-MG 系统桥臂故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(7): 1-13.  
WANG Hailiang, WANG Xinggui, LI Jinjian, et al. Bridge arm fault diagnosis of the MMC-MG system based on an improved support vector machine[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(7): 1-13.
- [18] RUIZ L Y, GARCIA G M, SALAS A R, et al. Fault diagnosis in a photovoltaic grid-tied chb multilevel inverter based on a hybrid machine learning and signal processing technique[J]. IEEE Access, 2024, 12: 128909-128928.
- [19] FAN Chenxi, XIAHOU Kaishun, WANG Lei, et al. Hybrid fault diagnosis of multiple open-circuit faults for cascaded H-bridge multilevel converter based on perturbation estimation convolution network[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 1-12.
- [20] 陈超波, 王霞霞, 高嵩. 基于区间滑模观测器的逆变器开路故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(14): 4569-4579.  
CHEN Chaobo, WANG Xiaxia, GAO Song. A diagnosis method for open-circuit faults in inverters based on interval sliding mode observer[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(14): 4569-4579.
- [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 Shuiqing, HUANG Wenzhan, HE Yigang, 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] 谢东, 葛兴来. 基于残差变化率的单相级联 H 桥整流器 IGBT 开路故障诊断[J]. 电工技术学报, 2018, 33(16): 3822-3834.  
XIE Dong, GE Xinglai. Residual-changing-rate based open-circuit fault diagnosis for a single-phase cascaded H-bridge rectifier[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(16): 3822-3834.
- [23] 许水清, 王健, 胡友强, 等. 基于自适应滑模观测器的高铁牵引系统单相三电平整流器开路故障诊断[J]. 控制理论与应用, 2023, 40(11): 1920-1930.  
XU Shuiqing, WANG Jian, HU Youqiang, et al. Open-circuit fault diagnosis of single-phase three-level rectifier in high-speed train traction system based on adaptive sliding mode observer[J]. Control Theory & Applications, 2023, 40(11): 1920-1930.
- [24] 郑征, 毛绍冉. 一种自适应滑模观测器的感应电动机转速辨识研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2022, 55(2): 168-174.  
ZHENG Zheng, MAO Shaoran. Research on speed identification of induction motor of an adaptive sliding mode observer[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2022, 55(2): 168-174.
- [25] KALSI K, LIAN Jiaming, HUI S, et al. Sliding-mode observers for systems with unknown inputs: a high-gain approach[J]. Automatica, 2010, 46(2): 347-353.
- [26] GONG Chao, HU Yihuai, GAO Jinqiu, et al. An improved delay-suppressed sliding-mode observer for sensorless vector-controlled PMSM[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 67(7): 5913-5923.
- [27] LIU Zehao, XIAO Lan, CAO Xin, et al. A faulty submodule mathematical model-based localization strategy for switch open-circuit fault of module multilevel converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 38(3): 3899-3916.
- [28] SHAO Shuai, WATSON A J, CLARE J C, et al. Robustness analysis and experimental validation of a fault detection and isolation method for the modular multilevel converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 31(5): 3794-3805.
- [29] 王付胜, 陈韬, 窦盛, 等. 级联 H 桥光伏逆变器开关管开路故障诊断[J]. 太阳能学报, 2022, 43(5): 187-192.  
WANG Fusheng, CHEN Tao, DOU Sheng, et al. Diagnosis of open-circuit fault of switch tube of cascaded H-bridge photovoltaic inverter[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(5): 187-192.
- [30] CHEN Yuanhui, HE Jinwei. Fault detection and ride through of CHB converter-based star-connected STATCOM through exploring the inherent information of multiloop controllers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 38(2): 1366-1371.

收稿日期: 2024-12-10; 修回日期: 2025-05-14

作者简介:

郑征(1965—), 女, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为可再生新能源功率变换与并网技术、大功率电力电子与电力系统控制; E-mail: zhengzh@hpu.edu.cn

薄佳林(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为级联H桥逆变器开路故障诊断; E-mail: 3383728931@qq.com

李斌(1987—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为新能源并网控制。E-mail: libin@hpu.edu.cn

(编辑 许威)