DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.3.324　　**中图分类号**：TM464　　**文献标志码**：A

模块化多电平变换器子模块单管开路故障诊断与定位方法

孙向东(中国电源学会会员)，王周瑞兴，吴宇臣，任碧莹，
安　杨(中国电源学会会员)
(西安理工大学电气工程学院，西安 710048)

摘要：模块化多电平变换器MMC(modular multilevel converter)常采用排序均压算法作为子模块电容电压控制策略，此时存在半桥子模块上管开路故障定位困难的问题，由此提出1种基于重构子单元电压的MMC子模块绝缘栅双极型晶体管IGBT(insulated gate bipolar transistor)开路故障定位方法。建立了三相MMC电压回路方程，分析了半桥子模块发生单管开路故障时电流流通路径对电容电压的影响，以及导致输出电流与桥臂环流发生异常的原因。采用基于扩展卡尔曼滤波器EKF(extended Kalman filter)的自适应状态观测器对输出电流和桥臂环流进行最优估计，利用上述最优估计值与实际采样值之间的残差进行故障诊断。随后对三相系统中与故障桥臂位置相同的子模块进行分组重构，得到重构子单元，利用基于EKF的自适应状态观测器估计重构子单元电压，将其与对应的重构子单元实际电压平均值之间的差值与设定的阈值进行比较，从而实现故障定位。选取4种典型子模块IGBT开路故障工况进行实验验证，实验结果表明所提出的故障诊断及定位方法正确可行。

关键词：模块化多电平变换器；单管开路故障诊断与定位；扩展卡尔曼滤波器；自适应状态观测器；重构子单元电压

Diagnosis and Localization Method for Single-switch Open-circuit Fault in Submodules of Modular Multilevel Converter

SUN Xiangdong, *Member*, *CPSS*, WANG Zhouruixing, WU Yuchen, REN Biying,
AN Yang, *Member*, *CPSS*
(College of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The sorting voltage equalization algorithm is often used as a submodule capacitor voltage control strategy for a modular multilevel converter (MMC), which poses a challenge in locating the open-circuit fault of an upper switch in a half-bridge submodule. To solve this problem, a method for locating the insulated gate bipolar transistor (IGBT) open-circuit fault in the submodule of MMC based on reconstructed subunit voltage is proposed. The voltage circuit equation of a three-phase MMC is established, and the influence of current flow path on the capacitor voltage and the reasons for abnormal output current and bridge arm circulating current are analyzed when an open-circuit fault for a single-switch occurs in the half-bridge submodule. An adaptive state observer based on extended Kalman filter (EKF) is used to achieve the optimal estimation of output current and bridge arm circulating current, and fault diagnosis is performed using the residuals between the optimal estimation value and the actual sampling value. Subsequently, the submodules with the same position as the faulty bridge arm in the three-phase system are grouped and reconstructed, so as to obtain the reconstructed subunits. The adaptive state observer based on EKF is utilized to estimate the reconstructed subunit voltage, and the difference between the estimated value and the actual average voltage of the corresponding reconstructed subunit is compared with a preset threshold, thus achieving the fault localization. Four typical IGBT open-circuit fault conditions

收稿日期：2025-07-24；**修回日期**：2025-08-22；**录用日期**：2025-09-12；**网络首发日期**：2025-10-16
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52477196)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 52477196

of submodules were selected for experimental verification, and experimental results show that the proposed fault diagnosis and localization method is correct and feasible.

Keywords: Modular multilevel converter (MMC); single-switch open-circuit fault diagnosis and localization; extended Kalman filter (EKF); adaptive state observer; reconstructed subunit voltage

模块化多电平变换器 MMC(modular multilevel converter)具有模块化设计、集成度高、输出波形质量高等特点，目前已在柔性直流输电、新能源并网等场合得到应用[1-5]。MMC 子模块数量很多，子模块中的绝缘栅双极型晶体管 IGBT(insulated gate bipolar transistor)是整个系统中最易发生故障的部分，若不及时发现故障并处理，则可能会进一步引起其他故障发生，最终导致系统崩溃，因此需要对 MMC 子模块进行故障诊断。子模块中 IGBT 故障主要包括开路故障和短路故障[6-8]，短路故障会导致较大的电流冲击，对系统危害极大，通常由软硬件进行联合保护。相比之下，开路故障不会立即对变换器造成重大危害，但持续运行可能会使 MMC 的输出波形发生畸变，影响系统输出性能，甚至中断系统的运行。因此，在子模块发生 IGBT 开路故障时，快速、准确地检测并定位故障十分重要。

近年来，国内外学者对于 MMC 子模块 IGBT 开路故障诊断与定位的方法主要分为基于数据驱动和基于数学模型 2 类。文献[9-11]是基于数据驱动方法，将 MMC 系统电压、电流等信号采集并进行处理，根据正常和故障状态下数据特征不一致来进行故障诊断。文献[12-18]是基于数学模型方法，其中，文献[12]根据观测桥臂电压，利用其残差确定故障桥臂位置，再利用子模块电容电压故障特征引入相应的修正量，根据符号关系实现故障子模块的定位；文献[13]根据子模块实际投切数量与理论值之间的差异，建立开关管、反并联二极管故障之间的映射关系，并基于此完成对功率器件的故障诊断；文献[14-15]运用滑模观测器实现对子模块 IGBT 故障的检测，此类方法在实际操作中需要全面遍历系统内的各类状态变量，运算量较大；文献[16-18]借助卡尔曼滤波算法，针对桥臂环流及子模块电容电压分别构建了状态观测器。通过对桥臂环流和子模块电容电压进行实时监测与分析，精准获取其运行特征。当运行特征与故障特征相匹配并持续一段时间后，实现故障诊断。文献[19]将数学模型与数据驱动相结合，形成融合诊断方案，通过动态分析故障状态下子模块电容电流的实际流通路径偏差实现故障诊断，对子模块电容电压构建观测器，并结合最小二乘支持向量机网络实现故障定位。综上所述，基于数据驱动的方法往往需要大量的样本进行训练，实际工程中的大量样本很难获取，这影响了故障诊断与定位的准确性。基于数学模型的方法相对简单易行，特别是扩展卡尔曼滤波算法在计算复杂度和估计精度之间具有较好的平衡，在状态观测器方面尤为成熟，在工程领域应用极其广泛，因此，本文主要采用扩展卡尔曼滤波器 EKF(extended Kalman filter)进行自适应状态观测，以便进一步实现故障诊断与定位。

基于半桥型子模块组成的三相 MMC 电路拓扑，本文采用排序均压算法作为子模块电容电压控制策略，此时存在半桥子模块上管开路故障定位困难的问题。针对上述问题，利用基于 EKF 的自适应状态观测器估计输出电流和桥臂环流，从而利用上述最优估计值与实际采样值之间的残差进行故障诊断，在此基础上，提出基于重构子单元电压的子模块 IGBT 开路故障定位方法，并通过实验验证所提方法的可行性和有效性。

1　MMC 子模块 IGBT 开路故障特性分析

图 1 为三相 MMC 电路拓扑，它由 a、b、c 三相单元连接而成，上、下 2 个桥臂单元构成相单元，每个桥臂单元包含 N 个半桥子模块。图 2 为单相 MMC 等效电路，采用基尔霍夫电压定律对 MMC 拓扑中上、下桥臂电压分析得到

$$R_{\mathrm{eq}} i_{pj} + L_{\mathrm{eq}} \frac{\mathrm{d}i_{\mathrm{pj}}}{\mathrm{d}t} = \frac{V_{\mathrm{dc}}}{2} - u_{pj} - u_{sj} \tag{1}$$

$$R_{\mathrm{eq}} i_{nj} + L_{\mathrm{eq}} \frac{\mathrm{d}i_{\mathrm{nj}}}{\mathrm{d}t} = \frac{V_{\mathrm{dc}}}{2} - u_{\mathrm{nj}} + u_{sj} \tag{2}$$

式中：V_{dc}为直流侧电压；R_{eq}、L_{eq}分别为考虑单相桥臂和线路等效后的电阻和电感；i_{pj}、i_{nj}分别为 j 相 p、n 桥臂电流，j=a, b, c；u_{pj}、u_{nj}分别为 j 相 p、n 桥臂电压；u_{sj}为 j 相输出侧电压。

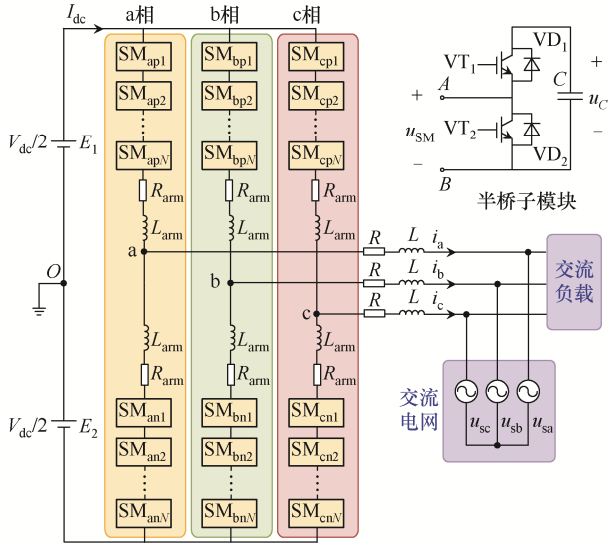


图 1 三相 MMC 电路拓扑

Fig. 1 Circuit topology of three-phase MMC

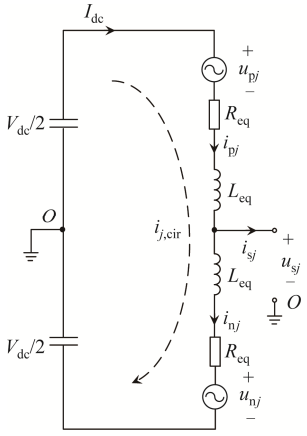


图 2 单相 MMC 等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of single-phase MMC

对式(1)和式(2)进行等效化简，得到三相 MMC 的输出电流控制回路和环流控制回路的数学表达式为

$$u_{sj} = u_{\mathrm{dj}} - \frac{R_{\mathrm{eq}}}{2} i_{sj} - \frac{L_{\mathrm{eq}}}{2} \frac{\mathrm{d}i_{sj}}{\mathrm{d}t} \tag{3}$$

$$u_{cj} + R_{\mathrm{eq}} i_{j,\mathrm{cir}} + L_{\mathrm{eq}} \frac{\mathrm{d}i_{j,\mathrm{cir}}}{\mathrm{d}t} = \frac{V_{\mathrm{dc}}}{2} \tag{4}$$

式中：u_{cj}、u_{dj}分别为共模电压和差模电压；i_{sj}为 j 相输出电流；$i_{j,\mathrm{cir}}$为 j 相桥臂环流。

此外，输出电流和桥臂环流与各桥臂电压 u_{rj} 之间的关系为

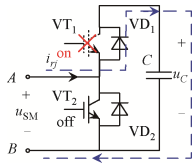
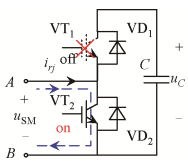
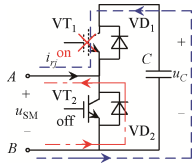
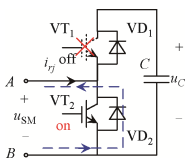
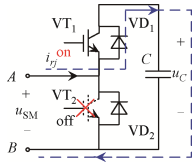
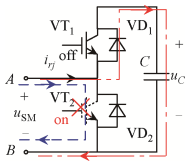
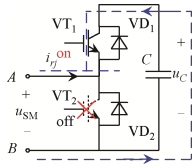
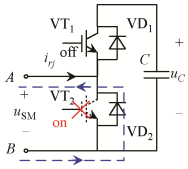
$$\frac{R_{\mathrm{eq}}}{2} i_{sj} + \frac{L_{\mathrm{eq}}}{2} \frac{\mathrm{d}i_{sj}}{\mathrm{d}t} = \frac{u_{\mathrm{nj}} - u_{pj}}{2} - u_{sj} \tag{5}$$

$$R_{\mathrm{eq}} i_{j,\mathrm{cir}} + L_{\mathrm{eq}} \frac{\mathrm{d}i_{j,\mathrm{cir}}}{\mathrm{d}t} = \frac{V_{\mathrm{dc}} - (u_{pj} + u_{\mathrm{nj}})}{2} \tag{6}$$

同一个子模块中可能发生 VT$_1$ 开路和 VT$_2$ 开路 2 种故障。这 2 种情况下，子模块内部电流的理论与实际的流通路径分别用虚线和点划线标出，见表 1。当 VT$_1$ 开路故障且桥臂电流大于 0 时，无论子模块处于投入还是切除状态，电流实际的流通路径均与正常运行状态时保持一致。当桥臂电流小于 0、子模块在切除状态时，电流实际流通路径也与正常运行状态相同。但是，子模块处于投入状态时，

表 1 VT$_1$、VT$_2$ 管开路故障时理论与实际的电流通路

Tab. 1 Theoretical and actual current paths when VT$_1$ and VT$_2$ are under open-circuit faults

故障类型	桥臂电流	投入状态	切除状态
VT$_1$ 开路故障	$i_{rj}>0$		
	$i_{rj}<0$		
VT$_2$ 开路故障	$i_{rj}>0$		
	$i_{rj}<0$		

由于 VT_1 开路，阻断了原有电流流通路径，电流通过反并联二极管 VD_2 流出子模块，电容 C 无法放电，使得该子模块从原来的放电状态转变为旁路状态，变相导致电容电压升高。

在 VT_2 出现开路故障且桥臂电流大于 0 时，若子模块处于投入状态，此时电流实际流通路径和正常运行时保持一致，子模块处于充电状态。然而，当子模块处于切除状态时，原来的电流流通路径被截断，故电流会通过反并联二极管 VD_1，并与电容 C 形成通路流出子模块，这使得该子模块由原来的旁路状态转变为充电状态，进而导致电容电压升高。当桥臂电流小于 0 时，子模块在投入和切除 2 种工作状态下均与正常运行状态时保持一致。

综上所述，VT_1 开路故障时，其故障特征仅体现在桥臂电流反向且子模块处于投入状态，因 VT_1 管开路使得故障子模块失去放电回路，变相导致电容电压上升。同时，在基于排序均压的子模块电容电压均衡控制策略的影响下，故障桥臂内所有子模块的电容电压均保持同步上升。VT_2 开路故障时，其故障特征仅体现在桥臂电流正向且子模块处于切除状态，因 VT_2 开路导致故障子模块处于充电状态，使得电容电压上升。于是，故障子模块输出电压出现异常，故障子模块所在桥臂电压也出现异常，由式(5)和式(6)可知故障相输出电流和桥臂环流都会发生异常。因此，输出电流和桥臂环流可以作为单管开路故障诊断的观测量。

2　子模块 IGBT 开路故障诊断及定位方法

2.1　基于 EKF 的系统输出电流和桥臂环流的最优估计及子模块 IGBT 开路故障诊断方法

以输出电流 i_{sj} 和桥臂环流 $i_{j,\mathrm{cir}}$ 为观测对象，将式(5)和式(6)改写为状态矩阵的表达形式，建立相关的状态观测器，矩阵表达式为

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{A}_1\boldsymbol{x}+\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{u}\\ \boldsymbol{y}=\boldsymbol{C}_1\boldsymbol{x}\end{cases}\tag{7}$$

式中，$\boldsymbol{x}$ 为基于电流的状态变量；$\boldsymbol{u}$ 为基于电压的输入变量；$\boldsymbol{A}_1$ 为状态转移矩阵；$\boldsymbol{B}_1$ 为控制输入矩阵。各系数矩阵的表达式为

$$\boldsymbol{x}=\begin{bmatrix}i_{j,\mathrm{cir}}\\ i_{sj}\end{bmatrix},\ \boldsymbol{u}=\begin{bmatrix}V_{\mathrm{dc}}\\ u_{\mathrm{p}j}\\ u_{\mathrm{n}j}\\ u_{sj}\end{bmatrix},\ \boldsymbol{A}_1=\begin{bmatrix}-R_{\mathrm{eq}}/L_{\mathrm{eq}} & 0\\ 0 & -R_{\mathrm{eq}}/L_{\mathrm{eq}}\end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{B}_1=\begin{bmatrix}\dfrac{1}{2L_{\mathrm{eq}}} & -\dfrac{1}{2L_{\mathrm{eq}}} & -\dfrac{1}{2L_{\mathrm{eq}}} & 0\\ 0 & -\dfrac{1}{L_{\mathrm{eq}}} & \dfrac{1}{L_{\mathrm{eq}}} & -\dfrac{2}{L_{\mathrm{eq}}}\end{bmatrix},\ \boldsymbol{C}_1=\boldsymbol{I},$$

$\boldsymbol{I}$ 为二阶单位矩阵。

根据式(7)设计基于 EKF 的自适应状态观测器，主要步骤如下。

(1)计算受观测系统先验状态估计值 $\hat{\boldsymbol{x}}_{[k]}^{-}$ 为

$$\hat{\boldsymbol{x}}_{[k]}^{-}=\boldsymbol{A}_1\hat{\boldsymbol{x}}_{[k-1]}+\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{u}_{[k-1]}\tag{8}$$

式中：$\hat{\boldsymbol{x}}_{[k]}^{-}$ 为 k 时刻的先验状态估计值，用 k−1 时刻的后验状态估计值 $\hat{\boldsymbol{x}}_{[k-1]}$ 来代替实际值 $\boldsymbol{x}_{[k]}$；$u_{[k-1]}$ 为 k−1 时刻的电压采样值。

(2)计算先验状态估计误差的协方差矩阵 $\boldsymbol{P}_{[k]}^{-}$ 为

$$\boldsymbol{P}_{[k]}^{-}=\frac{1}{\alpha_{[k]}}\boldsymbol{A}_{[k]}\boldsymbol{P}_{[k]}\boldsymbol{A}_{[k-1]}^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{Q}\tag{9}$$

式中：$\boldsymbol{P}_{[k]}$ 为 k 时刻的后验状态估计误差的协方差矩阵；$\boldsymbol{P}_{[k]}^{-}$ 为 k 时刻的先验状态估计的协方差矩阵；$\boldsymbol{A}$ 为雅可比矩阵；$\boldsymbol{Q}$ 为过程噪声的协方差矩阵；$0<\alpha\leqslant 1$ 为自适应因子，具体为[20]

$$\alpha_{[k]}=\begin{cases}1 & \mathrm{tr}(\boldsymbol{e}_{[k]}\boldsymbol{e}_{[k]}^{\mathrm{T}})\leqslant\mathrm{tr}(\boldsymbol{P}_{[k]})\\ \dfrac{\mathrm{tr}(\boldsymbol{P}_{[k]})}{\mathrm{tr}(\boldsymbol{e}_{[k]}\boldsymbol{e}_{[k]}^{\mathrm{T}})} & \mathrm{tr}(\boldsymbol{e}_{[k]}\boldsymbol{e}_{[k]}^{\mathrm{T}})>\mathrm{tr}(\boldsymbol{P}_{[k]})\end{cases}\tag{10}$$

式中：$\boldsymbol{e}_{[k]}$ 为预测残差，$\boldsymbol{e}_{[k]}=\hat{\boldsymbol{x}}_{\mathrm{mea}[k]}-\hat{\boldsymbol{x}}_{[k]}^{-}$，$\hat{\boldsymbol{x}}_{\mathrm{mea}[k]}$ 为 k 时刻的采样值；tr(·)为对矩阵求秩。

(3)计算最优估计的卡尔曼增益 $\boldsymbol{K}_{[k]}$ 为

$$\boldsymbol{K}_{[k]}=\boldsymbol{P}_{[k]}^{-}(\boldsymbol{P}_{[k]}^{-}+\boldsymbol{R})^{-1}\tag{11}$$

式中，$\boldsymbol{R}$ 为测量噪声的协方差矩阵。

(4)计算后验状态估计 $\hat{\boldsymbol{x}}_{[k]}$ (最优状态估计)为

$$\hat{\boldsymbol{x}}_{[k]}=\hat{\boldsymbol{x}}_{[k]}^{-}+\boldsymbol{K}_{[k]}(\boldsymbol{x}_{[k]}-\hat{\boldsymbol{x}}_{[k]}^{-})\tag{12}$$

(5)计算后验状态估计误差的协方差矩阵 $\boldsymbol{P}_{[k]}$ (最优估计误差协方差)为

$$\boldsymbol{P}_{[k]}=[\boldsymbol{I}-\boldsymbol{K}_{[k]}]\boldsymbol{P}_{[k]}^{-}\tag{13}$$

根据式(8)~式(13)完成自适应最优状态观测器的设计，实现对三相桥臂环流和输出电流的最优估计过程。

定义最优估计值与实际采样值的差为残差，则 j 相输出电流残差 $i_{sj,err}$ 和桥臂环流残差 $i_{j,cir,err}$ 的表达式为

$$\begin{cases} i_{sj,err} = \hat{i}_{sj,out} - i_{sj} \\ i_{j,cir,err} = \hat{i}_{j,cir,out} - i_{j,cir} \end{cases} \tag{14}$$

式中：$\hat{i}_{sj,out}$ 和 $\hat{i}_{j,cir,out}$ 分别为输出电流和桥臂环流的最优估计值；i_{sj} 和 $i_{j,cir}$ 分别为系统输出电流和桥臂环流的实际采样值。

根据$|i_{sj,err}|$与输出电流阈值 $I_{j,th}$ 及$|i_{j,cir,err}|$与桥臂环流阈值 $I_{j,cir,th}$ 的大小关系，判断 j 相是否存在故障。若$|i_{sj,err}|>I_{j,th}$ 且$|i_{j,cir,err}|>I_{j,cir,th}$，并且持续时间超过时间阈值 T_{th}，则说明 j 相内有子模块 IGBT 发生开路故障。再根据 $i_{sj,err}$、$i_{j,cir,err}$ 的正负关系，依据故障诊断判别关系式对 j 相故障代码 Fault_flag_j 赋值，确定故障桥臂位置和故障开关管类型。故障诊断方法如图 3 所示。故障诊断判别关系式为

$$\text{Fault_flag}_j = \begin{cases} 1 & i_{sj,err} < 0 \text{且} i_{j,cir,err} < 0 \\ 2 & i_{sj,err} > 0 \text{且} i_{j,cir,err} > 0 \\ 3 & i_{sj,err} > 0 \text{且} i_{j,cir,err} < 0 \\ 4 & i_{sj,err} < 0 \text{且} i_{j,cir,err} > 0 \end{cases} \tag{15}$$

式中，故障类型 1~4 分别代表上桥臂中有子模块的 VT_1 开路、上桥臂中有子模块的 VT_2 开路、下桥臂中有子模块的 VT_1 开路和下桥臂中有子模块的 VT_2 开路。

2.2 基于重构子单元电压的 IGBT 开路故障定位方法

通过上述基于输出电流和桥臂环流的残差只能诊断出故障桥臂和子模块中发生开路故障开关管的位置，并不能定位到发生开路故障的子模块。故障子模块电容电压上升最快，因为排序均压算法的缘故，系统会优先选择对桥臂内电容电压排序低的正常子模块进行充电操作，所以同一桥臂其他非故障子模块的电容电压缓慢同步上升，而非故障桥臂的子模块电容电压正常。基于上述现象，依据故障桥臂位置，对三相中各子模块分组重构建立重构子单元，重构分组方案如图 4 所示。以 r 桥臂电流正方向为基准，将

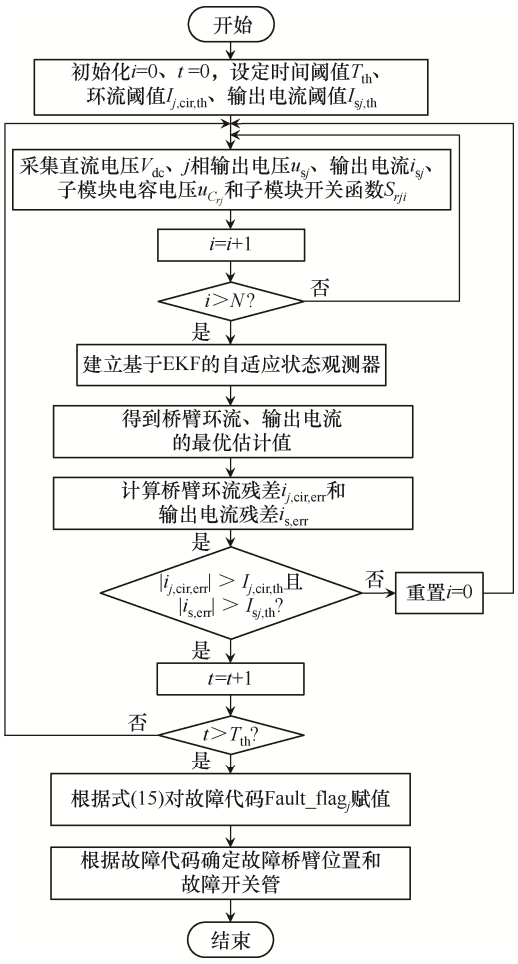


图 3 基于输出电流和桥臂环流的残差进行故障诊断流程

Fig. 3 Flow chart of fault diagnosis based on residuals between output current and bridge arm circulating current

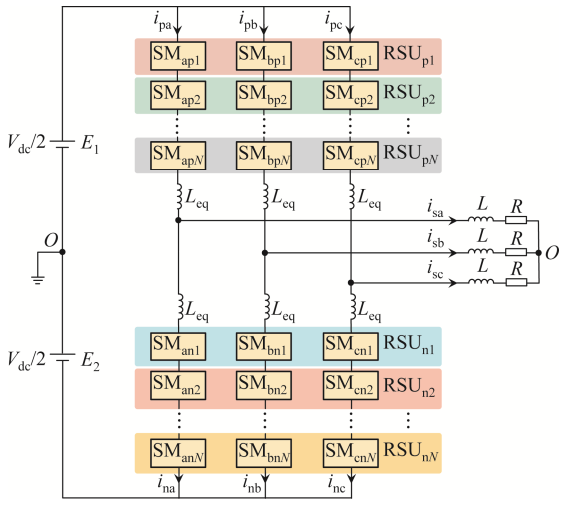


图 4 重构子单元组合后的 MMC 系统

Fig. 4 MMC system after RSU combinations

桥臂电流依次流过的子模块顺序标记为 1、2、…、i、…、N，将 a、b、c 相中 r 桥臂标号相同的子模

块进行组合，视为同一子单元，1 个子单元内有 SM_{ari}、SM_{bri} 和 SM_{cri} 3 个来源于不同相的子模块，命名为重构子单元 RSU(reconstructed subunit)。

对子模块进行分组后得到重构子单元，将第 i 个重构子单元电容电压之和定义为子单元电压，表示为 $u_{\mathrm{RSU}_{ri}}$，具体为

$$u_{\mathrm{RSU}_{ri}} = u_{\mathrm{SM}_{ari}} + u_{\mathrm{SM}_{bri}} + u_{\mathrm{SM}_{cri}} \tag{16}$$

用子模块的开关状态函数 S_{rji} 和所处位置的桥臂电流 i_{rj} 表示该电压为

$$C\frac{\mathrm{d}u_{\mathrm{RSU}_{ri}}}{\mathrm{d}t} = S_{rai}i_{\mathrm{ra}} + S_{rbi}i_{\mathrm{rb}} + S_{rci}i_{\mathrm{rc}} \tag{17}$$

式中，C 为子模块电容。

以重构子单元电压 $u_{\mathrm{RSU}_{ri}}$ 为观测对象，将式(17)改写为状态方程的矩阵形式为

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{A}_2\boldsymbol{x} + \boldsymbol{B}_2 i_{\mathrm{ra}} + \boldsymbol{C}_2 i_{\mathrm{rb}} + \boldsymbol{D}_2 i_{\mathrm{rc}} \\ \boldsymbol{y} = \boldsymbol{E}_2\boldsymbol{x} \end{cases} \tag{18}$$

式中，各系数矩阵的表达式为

$$\boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} u_{\mathrm{RSU}_{r1}} \\ u_{\mathrm{RSU}_{r2}} \\ \cdots \\ u_{\mathrm{RSU}_{rN}} \end{bmatrix},\ \boldsymbol{E}_2 = \boldsymbol{I},\ \boldsymbol{A}_2 = \frac{1}{C}\begin{bmatrix} 1 & & \\ & 1 & \\ & & \ddots \\ & & & 1 \end{bmatrix}_{N\times N},$$

$$\boldsymbol{B}_2 = \frac{1}{C}\begin{bmatrix} S_{ra1} & & \\ & \ddots & \\ & & S_{raN} \end{bmatrix},\ \boldsymbol{C}_2 = \frac{1}{C}\begin{bmatrix} S_{rb1} & & \\ & \ddots & \\ & & S_{rbN} \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{D}_2 = \frac{1}{C}\begin{bmatrix} S_{rc1} & & \\ & \ddots & \\ & & S_{rcN} \end{bmatrix}。$$

同样采用基于扩展卡尔曼滤波器的自适应观测器得到 r 桥臂 N 个重构子单元电压最优估计值。定义第 i 个重构子单元电压差值 $u_{\mathrm{RSU}_{ri},\mathrm{err}}$ 的表达式为

$$u_{\mathrm{RSU}_{ri},\mathrm{err}} = \hat{u}_{\mathrm{RSU}_{ri}} - u_{\mathrm{RSU}_{ri},\mathrm{ave}} \tag{19}$$

式中，$u_{\mathrm{RSU}_{ri},\mathrm{ave}}$ 为 r 桥臂第 i 个重构子单元电压的平均值，其计算式为

$$u_{\mathrm{RSU}_{ri},\mathrm{ave}} = \frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3} u_{\mathrm{RSU}_{ri}} \tag{20}$$

对式(19)的误差电压取绝对值得到 $\left|u_{\mathrm{RSU}_{ri},\mathrm{err}}\right|$，判断 $\left|u_{\mathrm{RSU}_{ri},\mathrm{err}}\right|$ 与重构子单元电压阈值 $U_{\mathrm{RSU,th}}$ 的大小，若第 i 个重构子单元电压误差绝对值 $\left|u_{\mathrm{RSU}_{ri},\mathrm{err}}\right| > U_{\mathrm{RSU,th}}$，并且持续时间超过所设定的时间阈值，则说明该重构子单元内有子模块发生开路故障，将故障子单元标志位 RSU_r_flag 置为 i，其中，r 为 p 或 n 时，即 RSU_p_flag 或 RSU_n_ flag，分别表示重构子单元上、下桥臂标志位。具体的故障定位流程如图 5 所示。

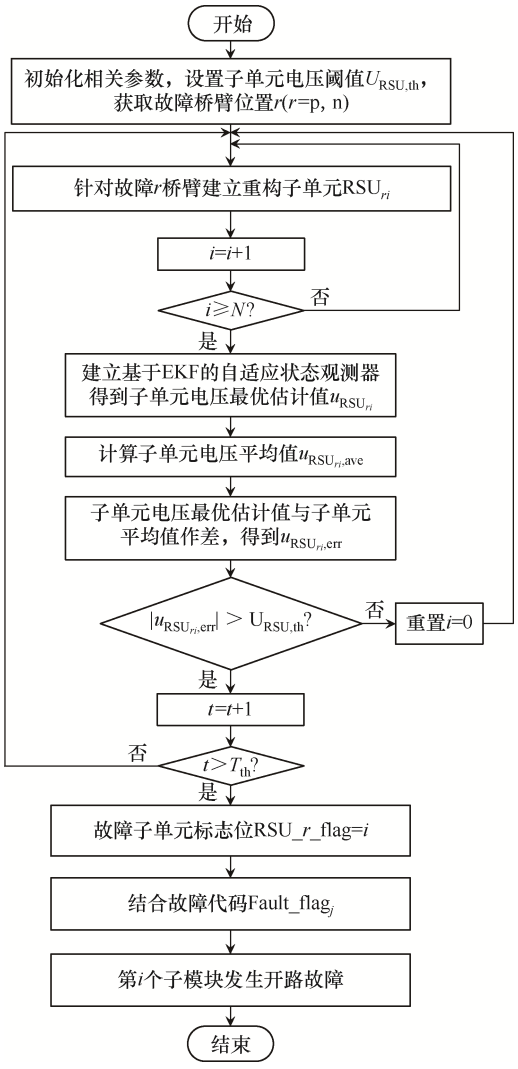


图 5　基于重构子单元电压的故障定位流程

Fig. 5 Flow chart of fault localization based on RSU voltage

综上，通过图 3 和图 5 所示的故障诊断与定位方法，可以准确实现子模块单管开路故障的诊断与定位。

3　实验验证与分析

图 6 为基于 ARM+FPGA 微处理器的三相五电平 MMC 逆变实验平台，实验参数见表 2。

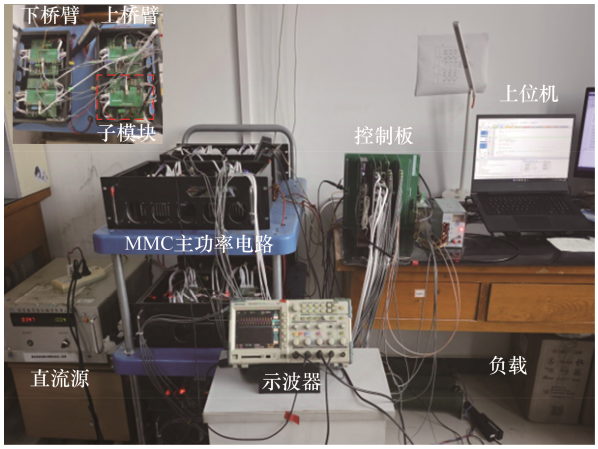


图 6 三相 MMC 实验平台

Fig. 6 Three-phase MMC experimental platform

表 2 实验参数

Tab. 2 Experimental parameters

参数	数值
直流电压 V_{dc}/V	100
子模块数量 N/个	4
桥臂电感 L_{arm}/mH	3
子模块电容 C/mF	2
负载电阻 R/Ω	10
输出电流阈值 $I_{j,th}$/A	8
桥臂环流阈值 $I_{j,cir,th}$/A	5
重构子单元电压阈值 $U_{RSU,th}$/V	5

ARM 处理器(STM32H750IBK6)是主控制器，负责数据中转与控制算法实现；FPGA(EP4CE-10F17C8N)是从控制器，承担数据采样、简易处理、生成 PWM 信号等功能；ARM 与 FPGA 之间通过 SPI 串行通信交换数据，ARM 利用串口通信把电流、子模块电容电压等关键数据传送至上位机 MATLAB 软件中，由上位机进行状态实时监测、数据存储和开路故障诊断与定位。为验证所研究方法的可行性和有效性，以 a 相为例，分别在 1 s 时模拟发生故障类型 1~4，利用上位机对数据进行处理。图 7~图 10 中从上到下的波形依次为输出电流实测值与最优估计值、输出电流残差、桥臂环流实测值与最优估计值、桥臂环流残差、重构子单元电压估计值与平均值、重构子单元电压差值、故障代码标志位和故障子单元标志位。

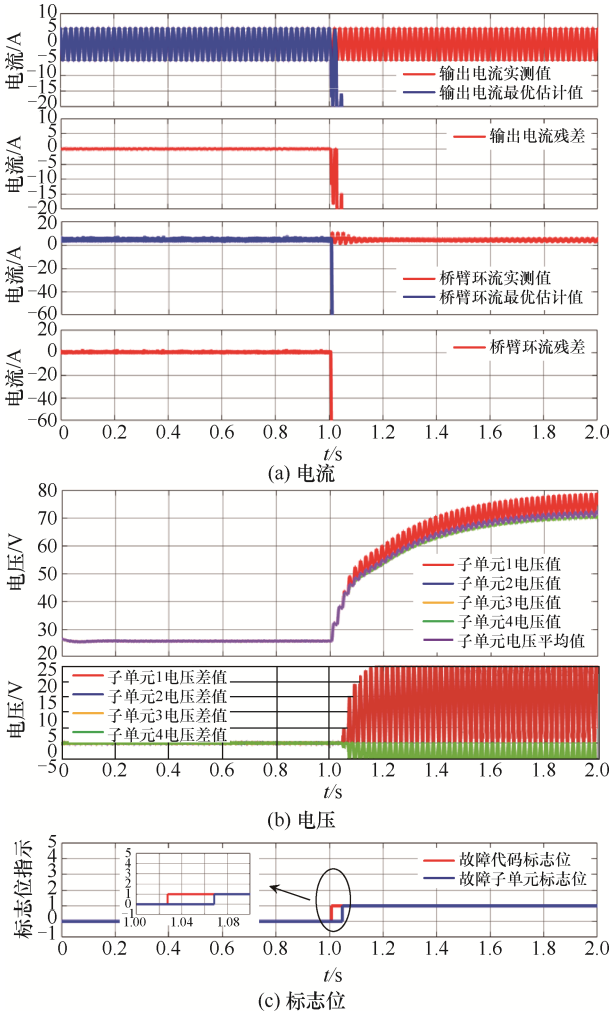


图 7 子模块 SM_{ap1} 出现故障类型 1 时的实验波形

Fig. 7 Experimental waveforms when submodule SM_{ap1} encounters type-1 fault

图 7 为 a 相子模块 SM_{ap1} 出现故障类型 1，即上桥臂第 1 个子模块 SM_{ap1} 内的 VT_1 在 1 s 时发生开路故障时的实验波形。可以看出，约经过 23 ms 将 $Fault_flag_a$ 置 1。约经过 64 ms 将 RSU_p_flag 置 1，表明故障发生在子单元 1 内部。结合 2 个标志位最终确定 a 相上桥臂第 1 个子模块 SM_{ap1} 中发生了 VT_1 开路故障。

图 8 为 a 相子模块 SM_{ap1} 出现故障类型 2，即上桥臂的第 1 个子模块 SM_{ap1} 内的 VT_2 在 1 s 时发生开路故障的实验波形。由图可知，约经过 10 ms 将 $Fault_flag_a$ 置 2。约经过 12 ms 将 RSU_p_flag 置 1，表明故障发生在子单元 1 内部。结合 2 个标志位最终确定 a 相上桥臂第 1 个子模块 SM_{ap1} 中发生

了 VT_2 开路故障。

图 9 为 a 相子模块 SM_{an2} 出现故障类型 3，即下桥臂的第 2 个子模块 SM_{an2} 内的 VT_1 在 1 s 时发生开路故障的实验波形。由图可知，约经过 10 ms 将 $Fault_flag_a$ 置 3。约经过 145 ms 将 RSU_n_flag 置 2，表明故障发生在子单元 2 内部。结合 2 个标志位最终确定 a 相下桥臂第 2 个子模块 SM_{an2} 中发生了 VT_1 开路故障。

图 10 为 a 相子模块 SM_{an3} 出现故障类型 4，即下桥臂的第 2 个子模块 SM_{an3} 内的 VT_2 在 1 s 时发生开路故障的实验波形。由图可知，约经过 14 ms 将 $Fault_flag_a$ 置 4。约经过 16 ms 将 RSU_n_flag 置

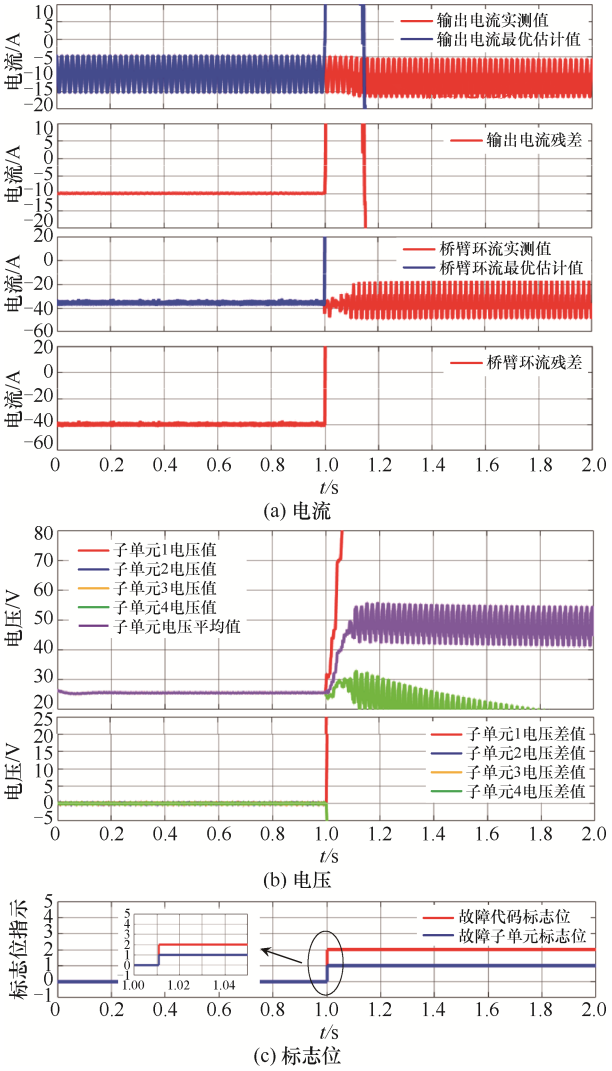


图 8　子模块 SM_{ap1} 出现故障类型 2 时的实验波形

Fig. 8 Experimental waveforms when submodule SM_{ap1} encounters type-2 fault

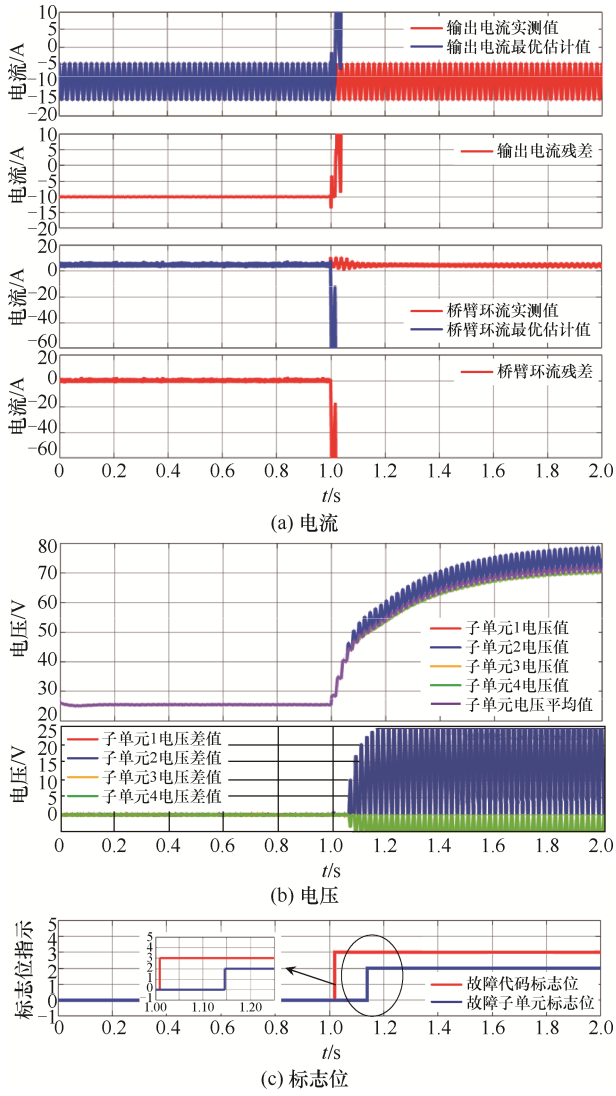


图 9　子模块 SM_{an2} 出现故障类型 3 时的实验波形

Fig. 9 Experimental waveforms when submodule SM_{an2} encounters type-3 fault

3，表明故障发生在子单元 3 内部。结合 2 个标志位最终确定 a 相下桥臂第 3 个子模块 SM_{an3} 中发生了 VT_2 开路故障。

总结上述实验结果见表 3，开路故障诊断时间较短，最长约 23 ms；子模块 VT_1 的开路故障定位时间(包括诊断时间)明显长于 VT_2 的定位时间，最长约 145 ms。另外，开路故障位置大体相同时本文故障定位方法与其他文献方法的响应时间对比见表 4，本文方法的定位时间相对较短。上述结果表明所提方法具有良好的子模块单管开路故障诊断与定位性能。

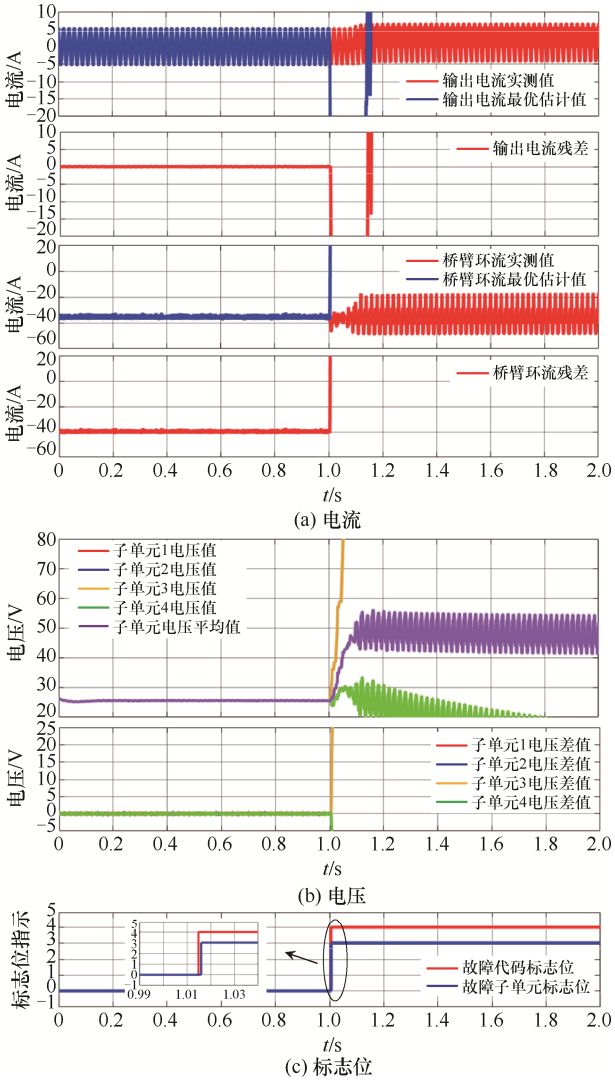


图 10 子模块 SM_{an3} 出现故障类型 4 时的实验波形

Fig. 10 Experimental waveforms when submodule SM_{an3} encounters type-4 fault

表 3 4 种故障类型下的故障诊断与定位时间

Tab. 3 Time for fault diagnosis and localization under four types of faults

故障类型	故障诊断时间/ms	故障定位总时间/ms
上桥臂子模块 VT_1 开路	23	64
上桥臂子模块 VT_2 开路	10	12
下桥臂子模块 VT_1 开路	10	145
下桥臂子模块 VT_2 开路	14	16

表 4 现有开路故障定位方法的响应时间对比

Tab. 4 Comparison of response time among existing open-circuit fault localization methods

故障类型	故障定位方法	响应时间/ms
上桥臂子模块 VT_1 开路	文献[10]	109
	文献[12]	96
	本文方法	64
下桥臂子模块 VT_2 开路	文献[10]	116
	文献[12]	44
	本文方法	16

4 结语

本文通过分析半桥子模块单管开路故障下三相 MMC 系统的电气特性，明确了 4 种故障类型下故障子模块电容电压变化趋势及输出电流、桥臂环流会受到影响。实验结果表明基于扩展卡尔曼滤波器的自适应状态观测器对输出电流、桥臂环流、重构子单元电压都实现了较为准确的最优估计；利用输出电流、桥臂环流的最优估计值与实际采样值之间的残差可以准确诊断出子模块中单管开路故障；利用重构子单元电压的最优估计值与对应的重构子单元实际电压平均值的差值可以定位到故障子模块；两者结合起来可以准确定位到某个子模块的 VT_1 或 VT_2 发生开路故障，解决了均压排序算法对 VT_1 开路故障诊断与定位的影响；在现有实验平台上故障诊断时间最多约 23 ms，故障定位时间最多约 145 ms，所提方法具有良好的子模块单管开路故障诊断与定位性能。本文方法的优点为：通过对三相输出电流和桥臂环流进行估计来实现开路故障诊断，其计算量与子模块的数量无关，有利于快速发现开路故障。通过估计重构子单元电压来实现开路故障定位，该计算量会随着子模块数量的增加而增加，但是由于并不是对每个子模块电压进行估计，而是对 N 组重构子单元电压进行估计，因此相对于所有子模块电压的估计，该方法的计算量减少 2/3，会显著减轻计算负担，利于工程实现。

参考文献：

[1] Xu Yuzhe, Zhang Zheren, Wang Guoteng, et al. Modular

multilevel converter with embedded energy storage for bidirectional fault isolation [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(1): 105-115.

[2] 薛国清, 贵献国, 李雄. 适用于 HVDC 和 HVAC 高效稳定互联的 MMC 双端口电网形成控制[J]. 电源学报, 2024, 22(3): 287-297.
Xue Guoqing, Gui Xianguo, Li Xiong. MMC dual-port grid-forming control for efficient and stable interconnection of HVDC and HVAC [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(3): 287-297. (in Chinese)

[3] 姚景昆, 齐山成, 柴世俊. 中压电机驱动系统前端并网 MMC 共模电压抑制[J]. 电源学报, 2024, 22(6): 280-287.
Yao Jingkun, Qi Shancheng, Chai Shijun. Grid-connected MMC common-mode voltage suppression at front end of medium-voltage motor driving system [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(6): 280-287. (in Chinese)

[4] 武鸿, 王跃, 薛英林, 等. 适用多功率的最近电平调制下 MMC 子模块开路故障诊断策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(1): 233-245, 302.
Wu Hong, Wang Yue, Xue Yinglin, et al. A diagnosis strategy for open-circuit submodule faults in MMCs under nearst level modulation suitable for different powers [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(1): 233-245, 302. (in Chinese)

[5] 刘欣, 袁易, 王利桐,等. 柔性直流输电系统三端口混合参数建模及其稳定性分析[J]. 电工技术学报, 2024, 39(16): 4968-4984.
Liu Xin, Yuan Yi, Wang Litong, et al. Three-port hybrid parameter modeling and stability analysis of MMC-HVDC system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(16): 4968-4984. (in Chinese)

[6] Hu Xing, Zhang Jianzhong, Xu Shuai, et al. Detection and location of open-circuit fault for modular multilevel converter [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 115: 105425.

[7] 张后谊, 李继凯, 徐玉韬, 等. 桥臂复用 MMC 三相短路故障特性及穿越策略[J]. 电源学报, 2025, 23(8): 93-104.
Zhang Houyi, Li Jikai, Xu Yutao, et al. Characteristics of arm multiplexing MMC under three-phase short-circuit faults and corresponding fault ride-through strategy [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(8): 93-104. (in Chinese)

[8] 刘靖伟, 马建军, 陈阳, 等. MMC 子模块 IGBT 开路故障与电压传感器故障联合诊断方法[J]. 电源学报, 2025, 23(8): 329-341.
Liu Jingwei, Ma Jianjun, Chen Yang, et al. Joint diagnosis method for IGBT open-circuit fault and voltage sensor fault in MMC submodule [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(8): 329-341. (in Chinese)

[9] Kiranyaz S, Gastli A, Ben-Brahim L, et al. Real-time fault detection and identification for MMC using 1-D convolutional neural networks [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(11): 8760-8771.

[10] 唐志军, 周刚, 晁武杰, 等. 基于多分类相关向量机的 MMC 多相故障诊断关键技术[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(16): 112-118.
Tang Zhijun, Zhou Gang, Chao Wujie, et al. Key technologies of MMC multiphase fault diagnosis based on a multi class correlation vector machine [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(16): 112-118. (in Chinese)

[11] 刘座辰, 林磊, 殷天翔, 等. 一种模块化多电平换流器子模块开路故障的快速检测与诊断方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(19): 4883-4894.
Liu Zuochen, Lin Lei, Yin Tianxiang, et al. A fast open-circuit fault detection and diagnosis method for sub-modules of modular multilevel converters [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(19): 4883-4894. (in Chinese)

[12] Zhou Dehong, Qiu Huan, Yang Shunfeng, et al. Submodule voltage similarity-based open-circuit fault diagnosis for modular multilevel converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(8): 8008-8016.

[13] Song Wensheng, Hou Nie, Wu Mingyi. Virtual direct power control scheme of dual active bridge DC-DC converters for fast dynamic response [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(2): 1750-1759.

[14] 刘玉林, 齐静静, 李家宁, 等. 一种基于桥臂电流畸变及自适应观测的 MMC 子模块开路故障诊断定位方法[J]. 电源学报, 2020, 18(3): 106-115.
Liu Yulin, Qi Jingjing, Li Jianing, et al. Diagnosis and location method for open-circuit fault in MMC submodule based on bridge arm current distortion and adaptive observation [J]. Journal of Power Supply, 2020, 18(3): 106-115. (in Chinese

[15] Song Chaochao, Sangwongwanich A, Yang Yongheng, et

al. A model-free capacitor voltage balancing method for multilevel DAB converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(1): 79-84.

[16] Deng Fujin, Chen Zhe, Khan M R, et al. Fault detection and localization method for modular multilevel converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(5): 2721-2732.

[17] 殷实, 谭国俊. 一种基于扩展卡尔曼滤波算法的 MMC 系统故障诊断策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(19): 74-84.
Yin Shi, Tan Guojun. A novel fault diagnosis strategy of MMC system based on EKFA [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(19): 74-84. (in Chinese)

[18] Lillo J, Rojas F, Pereda J, et al. Extended Kalman filtering for floating capacitor voltage estimation on triple star bridge cells [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2025, 72(8): 8646-8656.

[19] 杨兴武, 王江, 孟致丞, 等. 基于电容电流状态估计的 MMC 多管开路故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(23): 9297-9309.
Yang Xingwu, Wang Jiang, Meng Zhicheng, et al. MMC multiple IGBT open-circuit fault diagnosis method based on capacitor current state estimation [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(23): 9297-9309. (in Chinese)

[20] Yang Yuanxi, Gao Weiguang. A new learning statistic for adaptive filter based on predicted residuals [J]. Progress in Natural Science, 2006, 16(8): 833-837.



孙向东

作者简介：

孙向东(1971—)，男，中国电源学会会员，博士，教授。研究方向：电机控制技术，太阳能光伏发电技术，储能变流器技术，微电网控制技术。E-mail：sxd1030@xaut.edu.cn。

王周瑞兴(2003—)，男，通信作者，博士生。研究方向：储能变流器技术，电机控制技术，微电网控制技术。E-mail：332243 2884@qq.com。

吴宇臣(2000—)，男，硕士研究生。研究方向：储能变流器技术。E-mail：wuyu992cc@163.com。

任碧莹(1971—)，女，博士，教授。研究方向：储能变换技术，新能源发电技术，电动汽车充放电控制，微电网控制。E-mail：renby@xaut.edu.cn。

安杨(1990—)，男，中国电源学会会员，讲师。研究方向：模块化多电平故障诊断，AI 在电力电子中的应用。E-mail：1190313028@stu.xaut.edu.cn。

(责任编辑：孙美菊)