

基于电容电流状态估计的 MMC 多管开路故障诊断方法

用户研究成果简介：

上海电力大学杨兴武教授团队针对当前模块化多电平换流器多管开路故障定位方法存在故障阈值难选择、计算过程复杂、需增加额外检测环节等难题，提出将子模块电容电流的理论值和实际值误差作为新的故障诊断特征。采用无模型、鲁棒性强的最小二乘支持向量机最小二乘支持向量机网络作为新的故障定位方案，实现子模块多管开路故障的快速定位。诊断策略的有效性，已在远宽能源 StarSim 硬件在环实验平台验证。该文章现已被中国电机工程学报录用，且可在中国知网检索。

1.研究背景与意义：

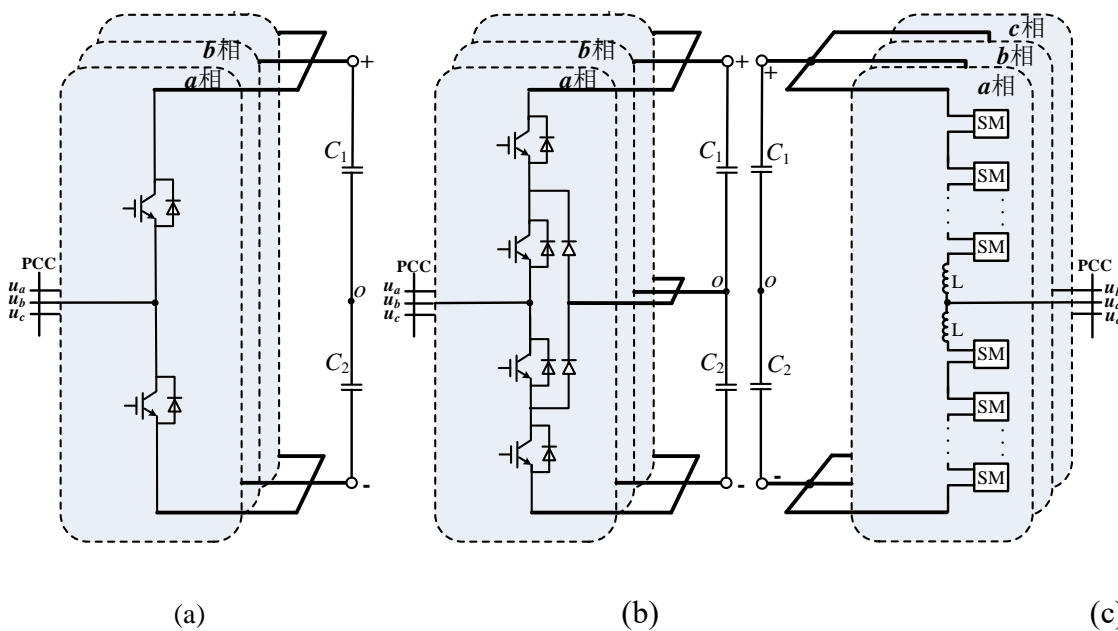
随着高比例分布式电源的接入、电动汽车充电需求的不断增加，作为与用户侧最为接近的电力输送环节，现有配电网的结构和运行方式正在不断面临新的挑战。分布式电源和电动汽车随机接入现有配电网中，部分时间段系统中存在反向潮流现象，此时配网末端电压可能超过限制，严重影响系统的安全稳定运行。



为了解决传统配电网现有结构和运行方式存在的电能容量分配不均衡、电能质量和供电可靠性低等问题，如何在保证分布式能源广泛接入、供电灵活可靠的前提下，保障电能的高效和经济传输与分配是未来智能化配电网的重要发展方向。2008 年荷兰埃因霍温理工大学提出了智能节点的概念，2010 年英国帝国理工学院提出了柔性联络开关，为柔性互联装置提供了后

续的理论依据。针对上述概念，国内提出了配电网柔性互联装置（Flexible Interconnection Devices, FID）的概念，应用柔性互联装置可以实现对频率、幅值和相位不相同的配网多端之间进行柔性互联。正常运行时，FID 可以调节各输出端口的功率，动态优化配电网的潮流分布，降低配电网运行损耗，提高电能输出质量。当系统中存在故障时，FID 装置可以实现故障的快速隔离，减小可能的停电范围，提高系统的供电可靠性和故障容错能力。

柔性互联拓扑从所采用的功率变换环节可以分交-交类型拓扑和交-直-交型两大类拓扑结构。其中交-交型拓扑与交-直-交型拓扑相比，可以减少一级直流变换环节，易于实现双端系统的柔性互联。相比之下，在三端及以上的系统中，交-直-交系统具备公共的直流母线，有效降低了互联系统的控制复杂度，提高了系统的扩展能力，在柔性互联领域具备较高的应用前景。



MMC 拓扑运行时各子模块之间为串联结构，有效降低了器件的耐压水平。基于现有模型预测控制策略，MMC 拓扑具备高能量转换效率、单位功率输出和易于模块实现的优点，逐渐成为了中低压柔性互联领域的热门拓扑。

MMC 因含有大量的子模块，系统故障率高、故障检测难度大。相关研究表明，开关器件故障引起的系统故障占比超 38%，是影响 MMC 系统安全稳定运行的主要因素。功率开关器件的故障可分为短路故障和开路故障，短路故障特征明显，通过电路保护可快速隔离故障。相较于短路故障，部分开路故障不影响系统整体运行，仅降低系统输出性能，但如果未及时进行故障处理，严重情况可能导致系统停机。因此，研究 MMC 系统快速有效的开路故障检测与定位，成为近年一个研究热点。

目前的故障定位策略主要分为基于模型、基于信号和人工智能算法三类，模型方法定位简单、速度快，但存在阈值选择和通用性低问题，基于人工智能的算法可解决模型策略缺点，但内部解释性低、算法复杂。其中、MPC 方法因此动态性能块、实现简单、控制性能好在故障诊断中得到了广泛应用、为了解决故障定位阈值问题同时结合人工智能算法具备的无模型和鲁棒

性高，在基于 MPC 和人工智能算法结合的故障定位工作做了相关研究。

2.LSSVM 故障诊断策略：

2.1 MMC 系统拓扑和数学模型

三相 MMC 电路拓扑结构，分为交流侧和直流侧，通过改变桥臂种各子模块投切状态，实现交直流侧功率交换。以单相为例，MMC 系统由上下两个桥臂组成，其中每个桥臂由 N 个结构相同的半桥子模块和一个桥臂电感组成。半桥子模块拓扑由一个直流储能电容 C 、两个互补的 IGBT (S_1 、 S_2)、两个续流二极管 (D_1 、 D_2) 组成。图 1 中： u_o 和 i_o 分别为交流侧输出电压和电流； u_p 和 i_p 分别为上桥臂电压和电流； u_n 和 i_n 分别为下桥臂电压和电流； L 为桥臂电感； U_{dc} 为直流侧电压； R 为电阻； L_o 为负载电感。

上、下桥臂电压方程为：

$$\begin{cases} u_p = \frac{1}{2}U_{dc} - u_o = \sum_{i=1}^{i=N} S_{pi}u_{cpi} \\ u_n = \frac{1}{2}U_{dc} + u_o = \sum_{i=1}^{i=N} S_{ni}u_{cni} \end{cases}$$

上、下桥臂电流方程为：

$$\begin{cases} i_p = \frac{1}{3}I_{dc} + \frac{1}{2}i_{cir} \\ i_n = \frac{1}{3}I_{dc} - \frac{1}{2}i_{cir} \end{cases}$$

基于采集到的桥臂电流实际值，建立子模块电容电压方程如下：

$$C \frac{du_{cxi}}{dt} = S_{xi}i_x$$

根据前向欧拉法对上式进行离散化处理，可得电容电压表达式：

$$u_{cpxi}(k+1) = u_{cpxi}(k) + \frac{1}{C}T_s S_{xi}i_x(k)$$

2.2 传统的基于电容电压的故障诊断策略

当 $S_{xi}=1$ 时，子模块上管 IGBT 导通，下管 IGBT 关断，此时该子模块投入到系统之中。如果桥臂电流 $i_x>0$ ，桥臂电流流经二极管 D_1 和电容 C ，直流侧电容处于充电状态；如果桥臂电流 $i_x<0$ ，桥臂电流流经上管 IGBT 和电容 C ，该子模块投入到系统之中，直流侧电容处于放电状态。当 $S_{xi}=0$ 时，子模块上管 IGBT 关断，下管 IGBT 导通，桥臂电流流经下管 IGBT 或其反并联二极管 D_2 ，此时桥臂电流的不同方向子模块均处于旁路运行状态。

桥臂电压估计值和测量值误差可以表示为

$$\square u_x(k) = u_{xe}(k) - u_{xm}(k)$$

式中： $u_{xe}(k)$ 为桥臂电压预测值， $u_{xm}(k)$ 为桥臂电压实际测量值。

现有故障诊断策略可大体分为基于软件和基于硬件两种，两者故障诊断策略大致相同，区别在于基于硬件的方法改变了传感器接入位置或数量，可以更快的定位故障子模块，然而现有运行系统中很难新增或改变安装位置。总结现有策略的问题与挑战如下：1、需要改变或增加传感器、2、电容电压显性度较低3、不能适用于整流和逆变两种运行工况。综上，找寻更加显性的故障特征，无需复杂的模型和算法即可在开路故障发生的起始阶段准确定位，成为开路故障诊断技术发展的一个主要方向。

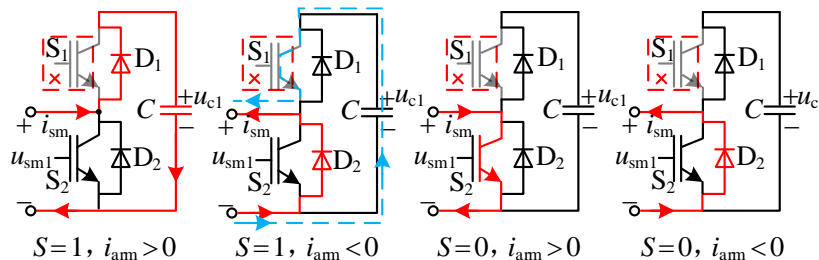
2.3 基于 LSSVM 的故障定位策略

1) 基于电容电流路径分析故障特征

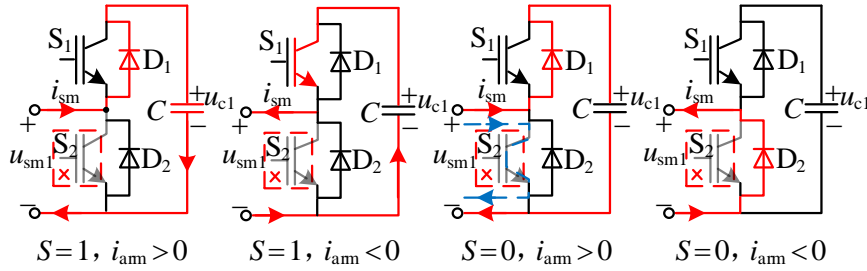
结合前文分析，提出了一种基于电容电流状态估计的计算策略，首先根据电容电压预测，建立子模块电容电流估算方程，分别估计子模块电容实际值和预测值，定义子模块电容电流误差 $i_{cerror}(k)$ 表达式如下：

$$i_{cerror}(k) = i_{cm}(k) - i_{cpre}(k)$$

当上管 S_1 故障，子模块电容电流实际路径与理论路径如图 2 所示。开关状态 $S=1$ 时，当桥臂电流 $i_x > 0$ ，桥臂电流流经二极管 D_1 和电容 C ，子模块电容电流理论路径与实际路径保持一致；当桥臂电流 $i_x < 0$ ，桥臂电流实际流经二极管 D_2 ，子模块电容上实际电流为 0，与子模块电容理论路径不符。开关状态 $S=0$ ，桥臂电流仅流过下管或二极管 D_2 ，上管开路故障不改变子模块电容电流路径。



当下管 S_2 故障，子模块电容电流实际路径与理论路径如图 3 所示。开关状态 $S=0$ 时，当桥臂电流 $i_x > 0$ ，桥臂电流流经二极管 D_1 和电容 C ，子模块电容上实际电流为桥臂电流，与子模块电容理论路径不符；当桥臂电流 $i_x < 0$ ，桥臂电流流经二极管 D_2 ，子模块电容电流理论路径与实际路径一致。开关状态 $S=1$ 时，桥臂电流仅流经上管 IGBT 或二极管 D_1 。



开路故障状态下，子模块电容电流误差值如下表所示。由下表分析可知，正常状态下子模块电容电流误差为零，与工作状态无关。当 $S=1$ 、 $i_x < 0$ 和 $S=0$ 、 $i_x > 0$ 时，发生 $S_1(S_2)$ 开路故障的子模块，其电流误差值等于当前时刻桥臂电流。在其余的工作状态，故障子模块电容电流误差为零。

两种故障类型下的电容电流误差

工作状态	正常	S_1 开路	S_2 开路
$S=1 \& i_x > 0$	$i_{cerror}=0$	$i_{cerror}=0$	$i_{cerror}=0$
$S=1 \& i_x < 0$	$i_{cerror}=0$	$i_{cerror}=i_x$	$i_{cerror}=0$
$S=0 \& i_x > 0$	$i_{cerror}=0$	$i_{cerror}=0$	$i_{cerror}=-i_x$
$S=0 \& i_x < 0$	$i_{cerror}=0$	$i_{cerror}=0$	$i_{cerror}=0$

2) 子模块电容电流误差故障特征计算

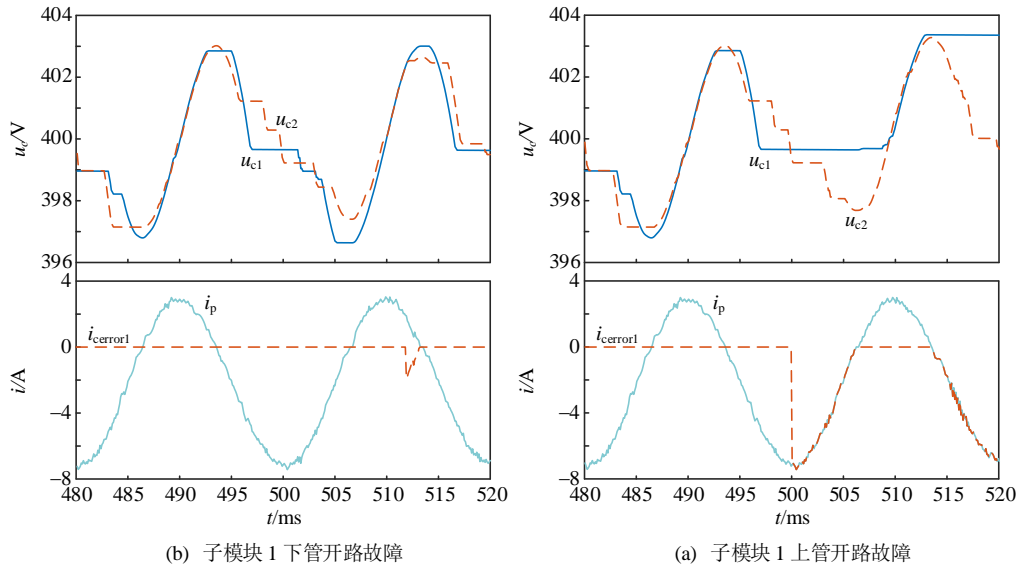
子模块电容电流预测值可由电压测量值进行估算：

$$i_{cpre}(k) = C \frac{u_{cpre}(k) - u_{cpre}(k-1)}{dt}$$

计算子模块电容电流实际值和预测值误差：

$$\begin{aligned} i_{cerror}(k) &= i_{cm}(k) - i_{cpre}(k) \\ &= C \left(\frac{u_{cpre}(k) - u_{cpre}(k-1)}{dt} - \frac{u_{cm}(k) - u_{cm}(k-1)}{dt} \right) \end{aligned}$$

为了更好的验证开路故障时电容电流特性，在 0.5s 设置下管故障，对比两种故障状态波形，子电容电流特征仅与桥臂电流和开关状态有关，且可在电容电压上升初期，快速定位故障。



3) LSSVM 故障定位流程

在充分利用 MMC 控制可用采样数据，不增加额外测量传感器的基础上，为了避免异常传感器数据和参数误差造成的随机误差，提出利用数据堆栈方法来获取电容电压样本数据。其中，栈区长度 $L=1/(T_s f_o)$ ， f_o 为输出电压频率。 k 时刻的电容电压堆栈操作规则如图所示。



在进行下一步故障诊断时，数据堆栈的方法可在故障特征序列构建时，保留上一时刻电流计算数据，仅需增加当前时刻电容电流误差数据，极大的简化了特征提取的计算量。

基于上述构建的 LSSVM 分类决策函数，本文的故障定位分为两个步骤，首先基于已知故障状态下的特征样本，对 LS-SVM 网络进行训练，找出样本的支持向量，确定最优分类超平面。最后，基于训练阶段得到的拉格朗日系数 α^* 、偏置量 β^* 及相应的支持向量，构建最小二乘支持向量机的分类决策函数为：

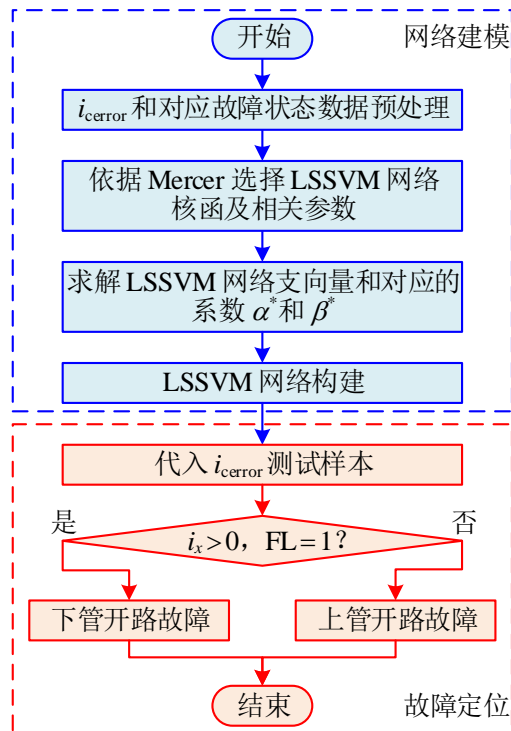
$$f(x) = \text{sgn}\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i y_i K(x, x_i) + \beta\right)$$

训练阶段的实现步骤为：

- 基于搭建的 MMC 仿真模型，仿真单管故障和多管故障情况，准备故障数据集。
- 准备训练样本数据集 X 、 Y 。其中样本数据集 X 为子模块故障特征值，样本数据集 Y 为对应的故障状态。
- 依据麦瑟(Mercer)定理选择 LSSVM 网络核函数 K 、拉格朗日系数 α 、偏置量 β 及相应的支持向量，构建 LSSVM 网络的分类决策函数。
- 训练样本集数据，求解分类决策函数，获取 MMC 子模块故障定位 LSSVM 的支持向量和对应的拉格朗日乘子 α^* 和偏置量 β^* 。

分类决策阶段的实现步骤为：

- a) 基于系数 α^* 和 β^* 及相应的支持向量, 构建适用于 MMC 子模块 IGBT 开路故障的 LSSVM 网络。
 - b) 输入未知故障特征值样本, 代入前一步构建的 LSSVM 网络, 给出子模块故障决策输出值 FL。在正常状态时 FL 赋值为 0, 故障状态时赋值为 1。
 - c) 由前一步决策输出值, 结合当前时刻桥臂电流方向, 给出故障样本具体故障类型。
- 基于构建的 LSSVM 网络, 对测试样本给出具体故障诊断结果, 故障定位流程如图所示。



3. 仿真和实验结果分析

3.1 基于 LSSVM 的故障定位策略

仿真中低压配电网柔性互联场景, 具体仿真参数如表所示, 其中开关故障设置采用取反开关信号的方式。

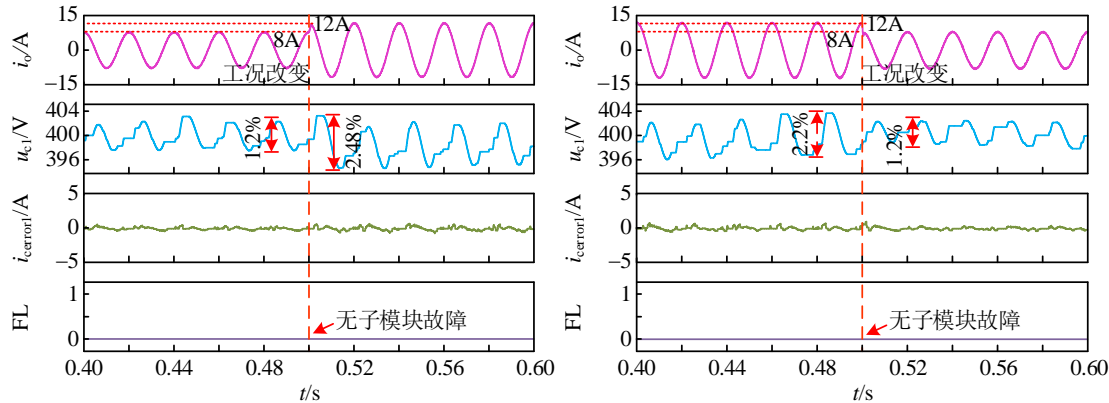
参数	取值	参数	取值
直流电压 U_{dc}/kV	4	网侧电感值 L_o/mH	10
网侧电压/kV	1.4	网侧侧电阻 R_o/Ω	0.001
桥臂子模块数 N	10	桥臂电感值 L/mH	10
子模块电压 u_c/kV	0.4	桥臂电阻 R/Ω	0
子模块电容 C/mF	2	采样频率/kHz	10

3.2 基于 LSSVM 的故障定位策略仿真验证

1) 输出侧电流阶跃时的故障特征分析

设定在 0.5s 时将交流侧电流 i_o 从 8A 增加到 12A，在切换过程，子模块电容电压波动小于 3%，故障特征值稳定在 0A 附近，所提定位算法对正常的工况改变不会产生误判。

设定在 0.5s 时将交流侧电流 i_o 从 12A 减少到 8A，在切换过程，子模块电容电压波动小于 3%，故障特征值稳定在 0A 附近，所提定位算法对正常的工况改变不会产生误判。



(a) 电流 i_o 从 8A 切换到 12A

(b) 电流 i_o 从 12A 切换到 8A

由上述仿真可知，所用控制算法可以快速跟踪交流侧输出电流指令、保持子模块电容电压稳定、故障特征保持在 0A 附近，故障定位算法工况改变不会误判。

1) 不同子模块同时发生不同类型开路故障

设定在 0.5s 时，上桥臂中子模块 1 和子模块 2 上管 IGBT 同时发生开路故障，故障发生后的起始阶段桥臂电流为正，子模块 1 上管 IGBT 开路故障不改变正常的充电和旁路回路，处于旁路状态的子模块 2 通过二极管 D_1 被错误投入电路中，子模块 2 电容电压严重偏离其余正常子模块，故障特征值 $i_{cerror2}$ 约等于桥臂电流 i_p 。当桥臂电流为负后，处于投入状态的子模块 1 通过二极管 D_2 被错误旁路，故障特征值 $i_{cerror1}$ 约等于当前时刻桥臂电流。由诊断结果可知，子模块 1 上管故障定位时长为 8.2ms，子模块 2 下管故障定位时长为 0.8ms。

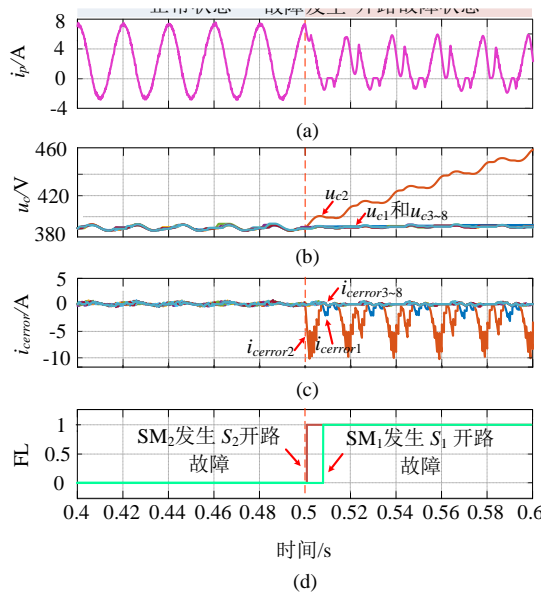
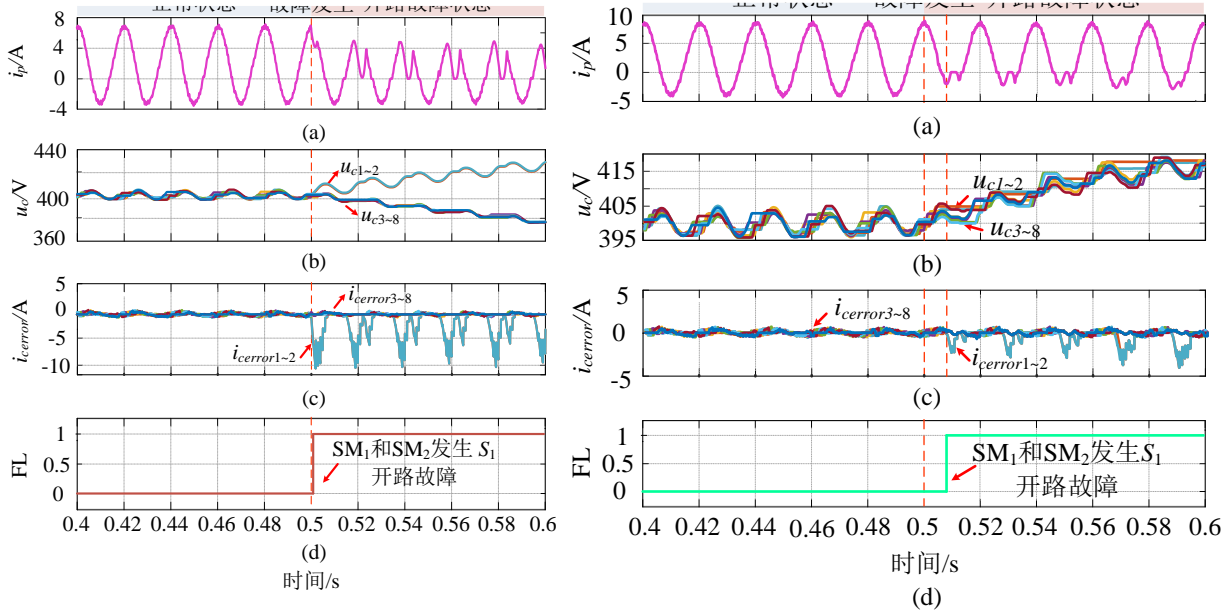
2) 不同子模块上管 IGBT 同时发生开路故障

设定在 0.5s 时，上桥臂中子模块 1 和子模块 2 上管 IGBT 同时发生开路故障，故障发生后的起始阶段桥臂电流为正，故障子模块通过二极管 D_1 投入电路中，子模块电容电压升高，故障特征信号保持在 0A 附近。桥臂电流为负后，处于投入状态的子模块 1 和子模块 2，通过二极管 D_2 被错误旁路，造成故障子模块电容电压严重偏离其余正常子模块，故障特征值 $i_{cerror1}$ 和 $i_{cerror2}$ 约等于当前时刻桥臂电流。故障诊断结果为上桥臂中子模块 1 和 2 上管 IGBT 发生开路故障，故障定位时长为 8.1ms。

3) 不同子模块下管 IGBT 同时发生开路故障

设定在 0.5s 时，上桥臂中子模块 1 下管和子模块 2 下管 IGBT 同时发生开路故障，故障发生后，子模块 1 和 2 均处于旁路状态，故障子模块通过二极管 D_1 被错误投入电路中，造成故障子模块电容电压严重偏离其余正常子模块，故障特征值 $i_{cerror1}$ 和 $i_{cerror2}$ 约等于当前时刻桥臂电流。故障诊断结果为上桥臂中子模块 1 和 2 下管 IGBT 发生开路故障，故障定位时长为 0.7ms。

基于 $S_1(S_2)$ 开路故障仅可在 $S=1$ 、 $i_x < 0$ 和 $S=0$ 、 $i_x > 0$ 时检测，由仿真结果可知，本文所提方法在故障可检测区间定位时间不超 10ms，剩余时间为故障发生到可被检测区间所需时间。

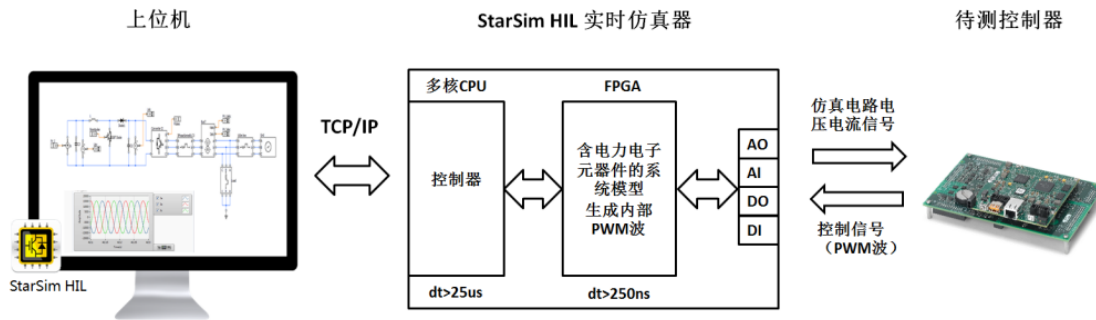


3.3 基于 LSSVM 的故障定位策略实验验证

采用 StarSimHIL 实时硬件在环平台，该平台可以基于 MATLAB/Simulink 平台搭建所需的主电路和控制电路，具有较高的适配性，实现了基于 FPGA 的硬件在环仿真系统。在使用前仅需将搭建的电路模型按所需的编码器进行编码，之后将模型编码导入上位机中，该平台便可以自动的将其按输入输出和实际的硬件 IO 进行映射，最终实现实时硬件在环实验。

StarSim HIL 平台的整体架构如下图 1 所示，系统由上位机、StarSim HIL 实时仿真器和待测控制器构成。其中上位机用于导入系统模型、控制 StarSim HIL 实时仿真器和观测和记录仿真结果。StarSim HIL 实时仿真器用于进行实际的硬件在环实验，其内部由 1 个多核 CPU 控制

器、1 个 FPGA 控制器和 1 套信号采集板构成。待测控制器一般用于输出 StarSim HIL 实时仿真器输出信号，最终借助示波器观测和记录该实验波形。



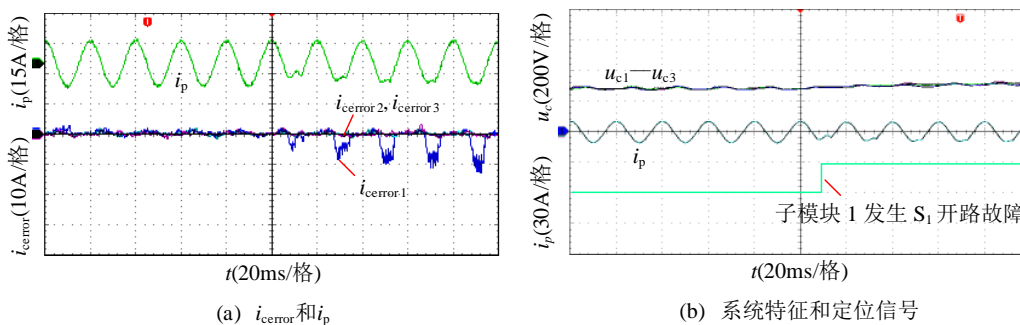
为了验证所提方法在阈值选取和开路故障诊断鲁棒性上的优势，本文选择与综合性能良好的基于系数故障诊断方法进行对比实验。

由于示波器通道限制，本文使用了两台示波器同步触发记录实验数据。其中示波器 1 用来记录 3 组误差信号和上桥臂电流 i_p 。示波器 2 用来记录上桥臂子模块电容电压 $u_{c1}—u_{c3}$ 和上桥臂电流 i_p 。为了更好的展示故障定位结果，将故障定位信号绘制在示波器 2 显示窗口。

1) 单个子模块上管 IGBT 开路故障实验。

下图为子模块上管 IGBT 开路故障实验波形，此时 MMC 工作在逆变状态，设定在 0.5s 时上桥臂子模块 1 发生上管 IGBT 开路故障。

故障起始阶段桥臂电流为正，子模块可通过二极管 D_1 投入电路中，电容电压升高，故障特征值稳定在 0A 附近。当桥臂电流为负后，处于投入状态的子模块 1，通过二极管 D_2 被错误旁路，故障子模块电容电压严重偏离其余正常子模块，桥臂电流波形出现严重畸变。故障诊断结果为上桥臂 SM_1 上管 IGBT 开路故障，符合设定的故障位置和故障类型，故障定位时长为 8.2ms。

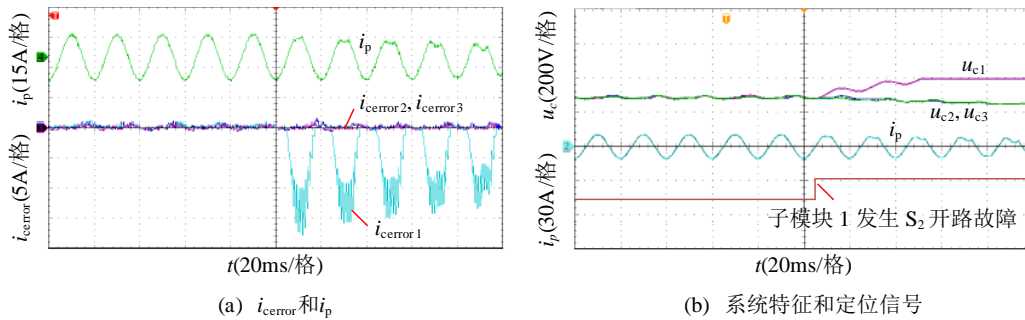


2) 单个子模块下管 IGBT 开路故障实验。

下图为子模块下管 IGBT 开路故障实验波形，此时 MMC 工作在逆变状态，设定在 0.5s 时上桥臂子模块 1 发生下管 IGBT 开路故障。

故障发生后起始阶段桥臂电流为负，子模块 1 通过上管 IGBT 正常投入电路中，故障特征值 $i_{cerror1}$ 稳定在 0A 附近。当桥臂电流为正后，旁路状态的子模块 1 通过二极管 D_1 错误投入电路中，电容电压上升，故障特征值 $i_{cerror1}$ 快速跟踪当前时刻的桥臂电流。由故障定位信号可知，

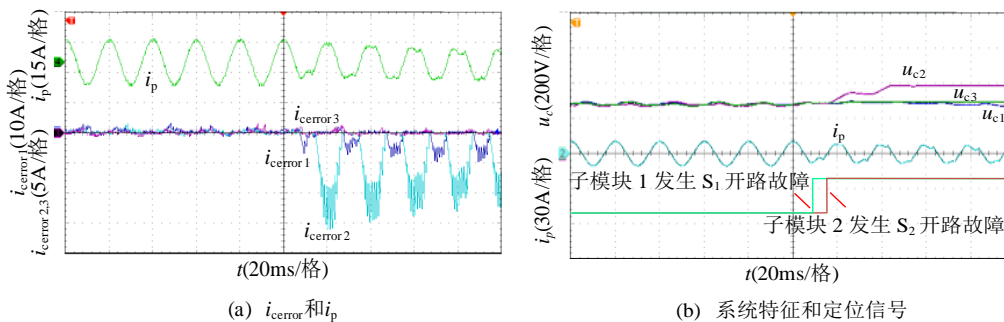
子模块 1 下管开路故障定位时间为 4.7ms。



3) 多个子模块同时发生不同类型开路故障实验。

下图为不同子模块 IGBT 同时发生开路故障的实验波形，设定在 0.5065ms 时，子模块 1 上管和子模块 2 下管发生 IGBT 开路故障。

上管 IGBT 故障发生后，投入状态的故障子模块 1 通过二极管 D_2 错误处于旁路运行状态，该子模块电容电压严重偏离其余正常子模块，故障特征值 $i_{cerror1}$ 快速跟踪当前时刻桥臂电流，其余故障特征值稳定在 0A 附近。当桥臂电流为正后，子模块 2 通过二极管 D_1 被错误投入电路中，电容电压上升，故障特征值 $i_{cerror2}$ 快速跟踪当前时刻桥臂电流，其余故障特征值稳定在 0A 附近。由故障定位信号可知，子模块 1 上管 IGBT 开路故障定位时间为 2.2ms，子模块 2 下管 IGBT 开路故障定位时间为 8.3ms。



实验结果可知，所提方法在电容电压较小的上升范围内，故障特征值明显，且在多管故障时子模块之间的影响较小。受传感器采样误差、系统参数误差和模型预测控制算法误差的影响，实际运行中所提故障特征存在一个较小的数值波动，但该波动不会造成故障诊断网络发生误判，且故障定位时间与仿真基本保持一致。