DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.8.329 **中图分类号**：TM46 **文献标志码**：A

MMC子模块IGBT开路故障与电压传感器故障联合诊断方法

刘靖伟[1]，马建军[2](中国电源学会会员)，陈 阳[3]，朱 淼[1]，文书礼[1]
(1.上海交通大学电力传输与功率变换控制教育部重点实验室，上海 200240；2.上海交通大学国家电投智慧能源创新学院，上海 200240；3.国网江苏省电力有限公司电力科学研究院，南京 211103)

摘要：模块化多电平换流器MMC(modular multilevel converter)系统中子模块数量众多，其开关故障与电压传感器故障多发，且部分故障特征相似，影响系统运行可靠性。提出1种基于滑模观测器的子模块IGBT开路和电压传感器故障联合诊断方法。该方法首先利用MMC系统桥臂电压实际值与测量值设计故障检测策略，检测MMC系统是否发生故障并实现桥臂级故障定位。在此基础上，基于滑模观测器，实现故障桥臂内子模块电容电压的在线估计，并与测量值进行对比，实现子模块级故障定位。最后通过仿真验证了所提故障诊断算法的有效性和鲁棒性。

关键词：模块化多电平换流器子模块；故障诊断；IGBT开路故障；电压传感器故障；滑模观测器

Joint Diagnosis Method for IGBT Open-circuit Fault and Voltage Sensor Fault in MMC Submodule

LIU Jingwei[1], MA Jianjun[2], *Member, CPSS*, CHEN Yang[3], ZHU Miao[1], WEN Shuli[1]
(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. College of Smart Energy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. Electric Power Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China)

Abstract: In a modular multilevel converter (MMC) system, there are numerous submodules, and switch faults and voltage sensor faults occur frequently. Some of these faults share similar characteristics, which can affect the system's operation reliability. A joint diagnosis method for submodule IGBT open-circuit faults and voltage sensor faults based on a sliding mode observer is proposed. First, a fault detection strategy is designed using the actual and measured values of the MMC system's arm voltage to detect faults in the MMC system and further achieve fault localization at the arm level. On this basis, the sliding mode observer is used to perform online estimation of the capacitor voltage within the faulted arm submodule, and the estimated values are compared with the measured values for submodule-level fault localization. Finally, simulation results verify the effectiveness and robustness of the proposed fault diagnosis algorithm.

Keywords: Modular multilevel converter (MMC) submodule; fault diagnosis; IGBT open-circuit fault; voltage sensor fault; sliding mode observer

模块化多电平换流器MMC(modular multilevel converter)具有谐波含量少、控制灵活、损耗低、电压功率易扩展等优势[1-5]，在柔性直流输电等领域受到了广泛关注和应用。然而在MMC系统中，子模块SM(submodule)数量众多，各类故障发生概率也显著增加[6]。一旦子模块发生故障，若不及时检测并隔离，将会对MMC系统的可靠性造成严重影响。

收稿日期：2025-01-16；**修回日期**：2025-03-21；**录用日期**：2025-04-12；**网络首发日期**：2025-05-15
基金项目：国家自然科学基金资助项目(U2166216)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant U2166216

MMC 子模块故障类型可分为子模块 IGBT 与传感器故障。2 类故障均会引起子模块内部工作状态变化，致使系统不能稳定运行。因此，针对 2 种类型故障的快速精确检测与定位，对 MMC 系统故障容错和保护具有重要意义。

MMC 子模块 IGBT 故障分为 IGBT 开路故障与 IGBT 短路故障[7-8]。其中，短路故障检测与保护可基于 MMC 系统内部集成硬件电路实现[9]；开路故障则较为隐蔽[10]，对于系统的影响具有一定潜伏性。依据故障诊断方法，现有研究包含基于机器学习[11-14]和基于模型机理分析[15-22]等多种故障诊断方法。

其中基于机器学习的故障诊断方法主要通过机器学习算法(如随机森林二分类器[11]、最小二乘支持向量机[12-13]、二维卷积神经网络[14])从大量数据中学习并提取故障特征，构造分类器来实现故障诊断，但其数据获取较为困难。基于模型机理分析的方法一般采用状态观测器(如滑模观测器[15,19]、自适应滑模观测器[21]、卡尔曼滤波器[22]等)来观测 MMC 系统某关键变量的值，并与测量值生成残差序列后与阈值进行比较，从而进行故障诊断，系统关键变量可以是桥臂电流[19,20]、输出相电流[17]、相间环流[17,22]、子模块电容电压[16,18]等。现有研究大多数仅针对子模块 IGBT 开路故障诊断，然而在实际 MMC 变流器系统中，除 IGBT 开路故障外，MMC 内部同时包含数量众多的电压传感器，同样影响系统的可靠稳定运行，其相关故障特性分析与故障应对策略缺乏足够的研究。

现有传感器故障研究多限于两电平与三电平逆变器。根据电压传感器故障类型，可将其分为断开故障、卡死故障及增益故障[23-24]。已有文献针对两电平逆变器系统 IGBT 开路故障和传感器故障的同时诊断进行了研究[25]。文献[26]通过将系统状态方程进行扩展和变换，对故障向量解耦，设计了 1 种基于降阶观测器的单相三电平整流器 IGBT 开路故障、电流传感器故障和电压传感器故障综合诊断策略；文献[27]通过将逆变器解耦为 2 个分别仅含有 IGBT 开路故障和传感器故障的子系统，构建自适应滑模观测器来区分不同类型故障。

从上述文献调研可知，现有的 MMC 子模块故障诊断算法存在以下问题：①数目庞大的电压传感器将导致较高的故障率，现有故障诊断算法仅考虑子模块 IGBT 的开路故障诊断，而未考虑电压传感器故障；②现有故障诊断算法诊断时间较长且阈值设计较为困难。

综上所述，相较于文献[11-22]仅适用于 IGBT 开路故障、文献[25-27]不适用于 MMC 系统，本文首次考虑了 MMC 子模块电压传感器故障特征，提出 1 种应用于 MMC 系统的子模块 IGBT 开路与电压传感器故障联合故障诊断方法。所提出的诊断策略可以在 20 ms 内实现对 IGBT 开路故障、电压传感器断开故障的快速诊断，且从理论上计算出了故障检测环节中每类故障的桥臂电压偏差值，便于阈值的计算和设计。

本文首先分别对子模块 IGBT 的 2 类开路故障和电压传感器 3 类典型故障进行故障建模和故障特性分析。然后通过对比 MMC 系统实际桥臂电压与测量桥臂电压设计了故障检测变量，用于检测系统是否发生故障并实现桥臂级故障定位。接着针对故障桥臂每个子模块设计了滑模观测器用于估计子模块电容电压，并与测量值进行对比，进而将故障定位到具体子模块。最后通过仿真验证了本文所提多类型故障联合诊断策略的有效性。

1 MMC 工作原理及子模块故障建模

本节首先对 IGBT 开路故障与电压传感器故障进行数学建模和故障特性分析，为后续设计快速、准确的多类型故障联合诊断策略奠定基础。

1.1 MMC 工作原理

三相 MMC 系统的一般性拓扑结构如图 1 所示，图中：$u_{\mathrm{arm},xj}$ 和 $i_{\mathrm{arm},xj}$ 分别为第 j 相第 x 桥臂上的所有子模块的电压总和与桥臂电流，x=p, n, p 为上桥臂，n为下桥臂；U_{dc} 为直流母线电压；I_{d} 为直流母线电流；L_0 为桥臂电感；L_{g} 为网侧电感；$U_{\mathrm{s}j}$ 为电网电压，j=a, b, c；$i_{\mathrm{phase},j}$ 为第 j 相的输出相电流。

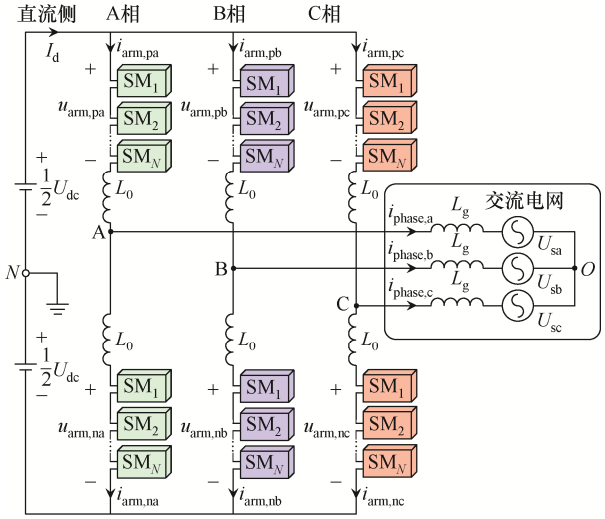


图 1　MMC 拓扑结构示意

Fig. 1 Schematic of MMC topology

对上、下桥臂分别列写基尔霍夫电压方程，即

$$\begin{cases} u_{\mathrm{arm},pj}+L_0\dfrac{\mathrm{d}i_{\mathrm{arm},pj}(t)}{\mathrm{d}t}+u_{\mathrm{phase},j}=\dfrac{1}{2}U_{\mathrm{dc}} \\ u_{\mathrm{arm},nj}+L_0\dfrac{\mathrm{d}i_{\mathrm{arm},nj}(t)}{\mathrm{d}t}-u_{\mathrm{phase},j}=\dfrac{1}{2}U_{\mathrm{dc}} \end{cases} \tag{1}$$

式中：$u_{\mathrm{phase},j}$ 为第 j 相的输出相电压。

采用最近电平逼近调制时，每相上、下桥臂投入子模块的个数分别为

$$\begin{cases} n_{pj}=\dfrac{N}{2}-\mathrm{round}\left(\dfrac{U_{\mathrm{ref},j}}{U_{\mathrm{dc}}/N}\right) \\ n_{nj}=\dfrac{N}{2}+\mathrm{round}\left(\dfrac{U_{\mathrm{ref},j}}{U_{\mathrm{dc}}/N}\right) \end{cases} \tag{2}$$

式中：n_{xj} 为第 j 相第 x 桥臂投入的子模块个数；N 为上、下桥臂的子模块数量；$U_{\mathrm{ref},j}$ 为第 j 相的参考调制波。

采用环流抑制策略后，桥臂电流可表示为

$$\begin{cases} i_{\mathrm{arm},pj}=\dfrac{I_{\mathrm{d}}}{3}+\dfrac{i_{\mathrm{phase},j}(t)}{2}=\dfrac{P}{3U_{\mathrm{dc}}}+\dfrac{i_{\mathrm{phase},j}(t)}{2} \\ i_{\mathrm{arm},nj}=\dfrac{I_{\mathrm{d}}}{3}-\dfrac{i_{\mathrm{phase},j}(t)}{2}=\dfrac{P}{3U_{\mathrm{dc}}}-\dfrac{i_{\mathrm{phase},j}(t)}{2} \end{cases} \tag{3}$$

式中，P 为 MMC 系统传输功率。

MMC 半桥子模块包含 2 个带有反并联二极管的 IGBT 和 1 个储能电容、1 个电压传感器。用 $U_{\mathrm{sm},xjk}$ 表示 MMC 系统第 j 相第 x 桥臂第 k 个子模块的端口电压，$U_{\mathrm{c,real},xjk}$ 表示子模块实际电容电压，$U_{\mathrm{c,meas},xjk}$ 表示子模块经电压传感器测量得到的电容电压。

1.2　子模块 IGBT 开路故障建模

根据子模块 IGBT 故障位置的不同，可以分为上开关开路 S_1OC(S_1 open-circuit)故障和下开关开路 S_2OC(S_2 open-circuit)故障。由 MMC 闭环系统调制后，对子模块定义给定开关函数为

$$S_{xjk}=\begin{cases} 1 & S_{xjk1}=1,S_{xjk2}=0 \\ 0 & S_{xjk1}=0,S_{xjk2}=1 \end{cases} \tag{4}$$

正常工作时，子模块电容电压实际值等于测量值，子模块端口电压可以表示为

$$U_{\mathrm{sm},xjk}=S_{xjk}U_{\mathrm{c,real},xjk}=S_{xjk}U_{\mathrm{c,meas},xjk} \tag{5}$$

当上管 S_1 发生开路故障时，若桥臂电流 $i_{\mathrm{arm},xj}$<0 且开关函数 S_{xjk}=1，如图 2(c)所示，则由于 S_1 开路，原应流经 S_1 并给电容放电的桥臂电流被迫流向 D_2，此时电容电流为 0，电容失去放电状态。其端口电压为

$$U_{\mathrm{sm},xjk}=\begin{cases} S_{xjk}U_{\mathrm{c,real},xjk} & i_{\mathrm{arm},xj}>0 \\ 0 & i_{\mathrm{arm},xj}<0 \end{cases} \tag{6}$$

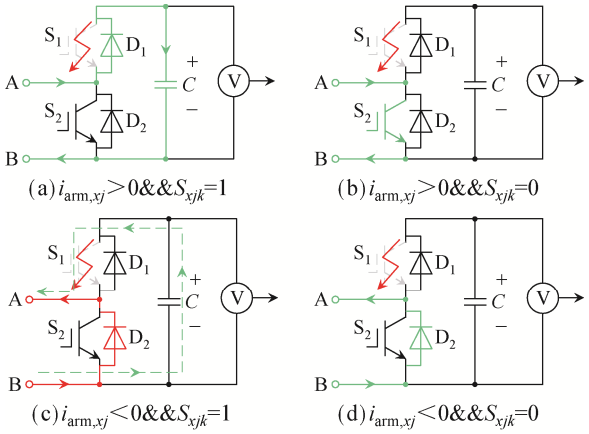


图 2　上开关故障示意

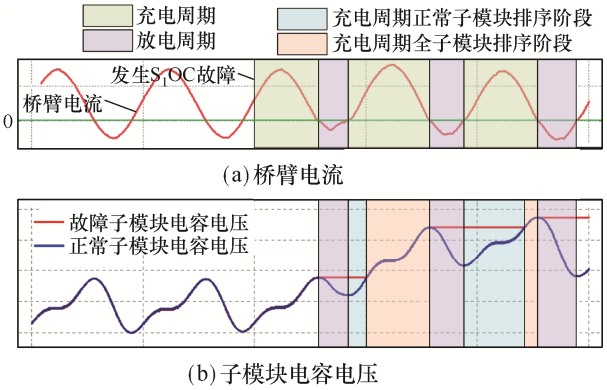
Fig. 2 Schematic of fault of upper switch

图 3 为发生 S_1OC 故障后，故障子模块在闭环控制作用下的充放电示意。S_1OC 故障会使故障桥臂在 $i_{\mathrm{arm},xj}$<0 的放电周期内，桥臂电压电平数由 n_{xj} 降低至 $n_{xj}-1$。

当下管 S_2 发生开路故障时，若 $i_{\mathrm{arm},xj}$>0 且给定开关函数 S_{xjk}=0，如图 4(b)所示，则由于 S_2 开路，原应流经 S_2 的桥臂电流被迫流向 D_1 并给电容充电，

此时电容电流被迫大于 0。其子模块端口电压为

$$U_{\mathrm{sm},xjk}=\begin{cases}U_{\mathrm{c,real},xjk} & i_{\mathrm{arm},xj}>0\\ S_{xjk}U_{\mathrm{c,real},xjk} & i_{\mathrm{arm},xj}<0\end{cases} \tag{7}$$



(a) 桥臂电流　(b) 子模块电容电压

图 3　S_1OC 故障时子模块充、放电阶段示意

Fig. 3 Schematic of SM charging and discharging stages under S_1OC fault

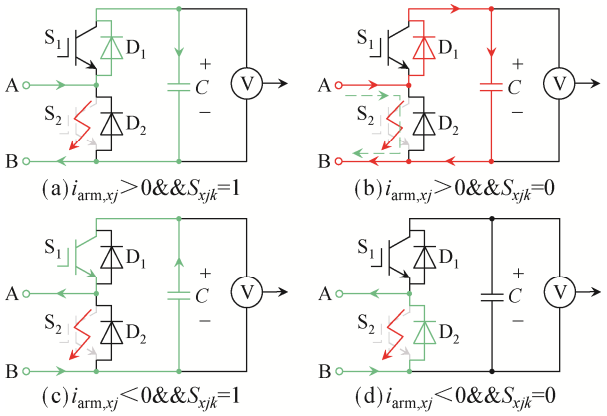
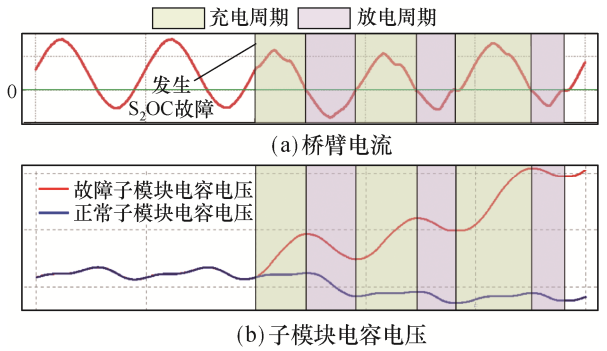


图 4　下开关故障示意

Fig. 4 Schematic of fault of lower switch

图 5 为发生 S_2OC 故障后，故障子模块在闭环控制作用下的充放电示意。S_2OC 故障会使故障桥臂在 $i_{\mathrm{arm},xj}>0$ 的充电周期内，桥臂电压电平数由 n_{xj} 增加至 $n_{xj}+1$。



(a) 桥臂电流　(b) 子模块电容电压

图 5　S_2OC 故障时子模块充、放电阶段示意

Fig. 5 Schematic of SM charging and discharging stages under S_2OC fault

将桥臂电流为正、负分别定义为“1”“0”，用变量 $I_{\mathrm{Logic},xj}$ 表示，即可定义等效开关函数 S^*_{xjk} 为

$$S^*_{xjk}=\begin{cases}S_{xjk}\ \&\&I_{\mathrm{Logic},xj} & \mathrm{S_1OC}\\ S_{xjk}\ \|\ I_{\mathrm{Logic},xj} & \mathrm{S_2OC}\end{cases} \tag{8}$$

该等效开关函数表明了发生开路故障时子模块的实际对外特性。

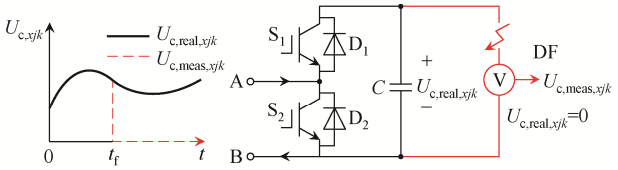
1.3　子模块电压传感器故障建模

根据电压传感器故障机理的不同，可以分为电压传感器断开故障 DF(disconnection fault)、增益故障 GF(gain fault)和卡死故障 SF(stuck fault)。

当 t_{f} 时刻发生 DF 时，$U_{\mathrm{c,meas},xjk}=0$，即

$$\begin{cases}U_{\mathrm{c,real},xjk}=U_{\mathrm{c,meas},xjk} & 0<t<t_{\mathrm{f}}\\ U_{\mathrm{c,real},xjk}\neq U_{\mathrm{c,meas},xjk}=0 & t\geqslant t_{\mathrm{f}}\end{cases} \tag{9}$$

故障后的电压波形及示意如图 6 所示。

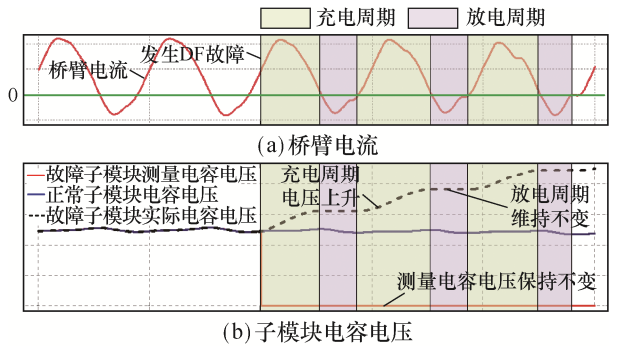


(a) DF电压波形示意　(b) DF子模块电路结构

图 6　电压传感器断开故障示意

Fig. 6 Schematic of voltage sensor disconnection fault

图 7 为发生 DF 故障后，故障子模块的充放电示意。其在 $i_{\mathrm{arm},xj}>0$ 时进入充电周期，$U_{\mathrm{c,real},xjk}$ 升高，$U_{\mathrm{c,meas},xjk}$ 维持 0 不变；在 $i_{\mathrm{arm},xj}<0$ 时进入放电周期，$U_{\mathrm{c,real},xjk}$ 和 $U_{\mathrm{c,meas},xjk}$ 均保持不变。其端口电压可表



(a) 桥臂电流　(b) 子模块电容电压

图 7　电压传感器断开故障充、放电阶段示意

Fig. 7 Schematic of charging and discharging stages under voltage sensor disconnection fault

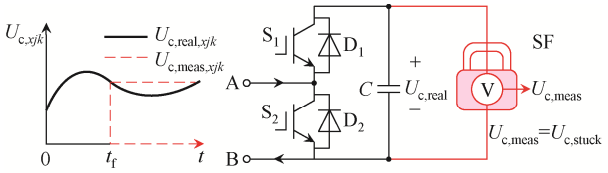
示为

$$U_{\mathrm{sm},xjk}=\begin{cases}U_{\mathrm{c,real},xjk} & i_{\mathrm{arm},xj}>0\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \tag{10}$$

当 t_{f}时刻发生 SF 时，$U_{\mathrm{c,meas},xjk}$=$U_{\mathrm{c,stuck}}$，$U_{\mathrm{c,stuck}}$为卡死时刻的电容电压测量值，即

$$\begin{cases}U_{\mathrm{c,real},xjk}=U_{\mathrm{c,meas},xjk} & 0<t<t_{\mathrm{f}}\\ U_{\mathrm{c,real},xjk}\neq U_{\mathrm{c,meas},xjk}=U_{\mathrm{c,stuck}} & t\geqslant t_{\mathrm{f}}\end{cases} \tag{11}$$

电压传感器卡死故障示意如图 8 所示。



(a)SF电压波形示意　　(b)SF子模块电路结构

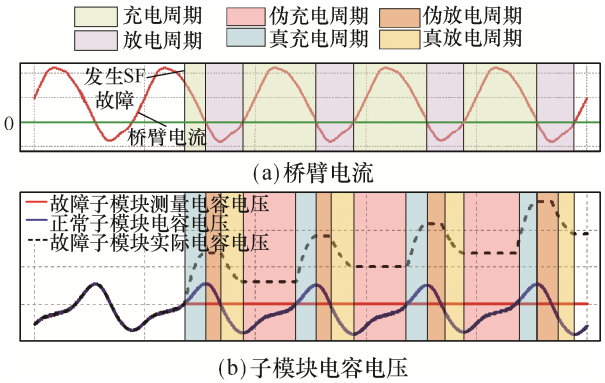
图 8　电压传感器卡死故障示意

Fig. 8 Schematic of voltage sensor stuck fault

图 9 为 SF 时子模块在闭环控制作用下的充放电示意，其端口电压可表示为

$$U_{\mathrm{sm},xjk}=\begin{cases}U_{\mathrm{c,real},xjk} & i_{\mathrm{arm},xj}>0\,\&\,U_{\mathrm{c,stuck}}<U_{\mathrm{c,Normal}}\\ U_{\mathrm{c,real},xjk} & i_{\mathrm{arm},xj}<0\,\&\,U_{\mathrm{c,stuck}}>U_{\mathrm{c,Normal}}\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \tag{12}$$

式中，$U_{\mathrm{c,Normal}}$ 为未发生故障时的子模块电容电压平均值。



(a)桥臂电流

(b)子模块电容电压

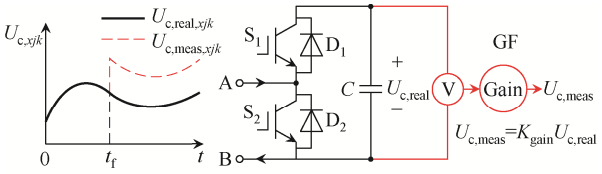
图 9　电压传感器卡死故障充、放电阶段示意

Fig. 9 Schematic of charging and discharging stages under voltage sensor stuck fault

当 t_{f}时刻发生 GF 时，测量电容电压为实际电容电压的增益倍，即

$$\begin{cases}U_{\mathrm{c,real},xjk}=U_{\mathrm{c,meas},xjk} & 0<t<t_{\mathrm{f}}\\ U_{\mathrm{c,meas},xjk}=K_{\mathrm{gain}}U_{\mathrm{c,real},xjk} & t\geqslant t_{\mathrm{f}}\end{cases} \tag{13}$$

式中，K_{gain} 为增益系数。增益故障示意如图 10 所示。



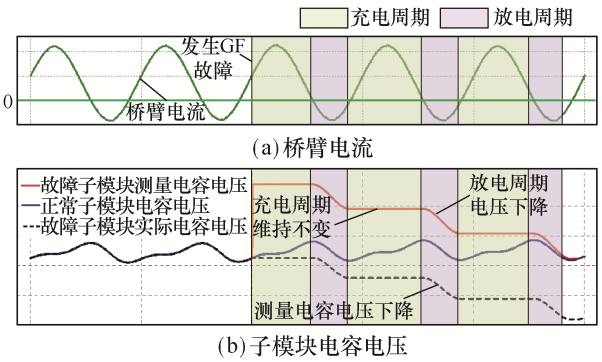
(a)GF电压波形示意　　(b)GF子模块电路结构

图 10　电压传感器增益故障示意

Fig. 10 Schematic of voltage sensor gain fault

图 11 为发生 GF 且 K_{gain}>1 时的子模块充、放电示意。当 $i_{\mathrm{arm},xj}$>0 时，$U_{\mathrm{c,real},xjk}$ 和 $U_{\mathrm{c,meas},xjk}$ 均保持不变；当 $i_{\mathrm{arm},xj}$<0 时，$U_{\mathrm{c,real},xjk}$ 和 $U_{\mathrm{c,meas},xjk}$ 均逐渐下降。其端口电压为

$$U_{\mathrm{sm},xjk}=\begin{cases}0 & i_{\mathrm{arm},xj}>0\\ \dfrac{U_{\mathrm{c,meas},xjk}}{K_{\mathrm{gain}}} & i_{\mathrm{arm},xj}<0\end{cases}\quad K_{\mathrm{gain}}>1$$
$$\begin{cases}\dfrac{U_{\mathrm{c,meas},xjk}}{K_{\mathrm{gain}}} & i_{\mathrm{arm},xj}>0\\ 0 & i_{\mathrm{arm},xj}<0\end{cases}\quad K_{\mathrm{gain}}<1 \tag{14}$$



(a)桥臂电流

(b)子模块电容电压

图 11　电压传感器增益故障充、放电阶段示意

Fig. 11 Schematic of charging and discharging stages under voltage sensor gain fault

2　新型故障联合诊断策略

针对MMC系统子模块开关开路故障和子模块电压传感器故障时的不同故障特征，本节设计 1 种基于滑模观测器的新型故障联合诊断方案，主要包括故障检测、故障定位 2 个部分。

2.1 故障检测方法

由第 1 节对 2 类 IGBT 开路故障和 3 类电压传感器故障特性的分析可知，IGBT 开路故障会引起给定开关函数与等效开关函数失配，电压传感器故障会导致测量电容电压与实际电容电压不符，两者均会引起子模块测量端口电压畸变，进而导致桥臂电压测量值偏离桥臂电压实际值。因此，结合给定开关函数与测量电容电压，选取故障检测变量 F_{xj} 来判断 MMC 变换器系统是否发生故障，并将故障定位到桥臂级，则其可表示为

$$F_{xj}=\frac{1}{T}\int_{t}^{t+T}\left|U_{\text{arm,Err},xj}\right|\mathrm{d}t \tag{15}$$

式中，$U_{\text{arm,Err},xj}$ 为第 j 相第 x 桥臂的实际桥臂电压与测量桥臂电压之间的偏差，可表示为

$$U_{\text{arm,Err},xj}=U_{\text{arm,real},xj}-U_{\text{arm,meas},xj} \tag{16}$$

桥臂电压实际值 $U_{\text{arm,real},xj}$ 可由式(1)推理得到

$$\begin{cases}U_{\text{arm,real,p}j}=\dfrac{1}{2}U_{\text{dc}}-U_{j,\text{phase}}-L_{\text{arm}}\dfrac{\mathrm{d}i_{\text{arm,p}j}}{\mathrm{d}t}\\ U_{\text{arm,real,n}j}=\dfrac{1}{2}U_{\text{dc}}+U_{j,\text{phase}}-L_{\text{arm}}\dfrac{\mathrm{d}i_{\text{arm,n}j}}{\mathrm{d}t}\end{cases} \tag{17}$$

式中：$U_{j,\text{phase}}$ 为桥臂电压；L_{arm} 为桥臂电感。

经电压传感器测量得到的桥臂电压测量值 $U_{\text{arm,meas},xj}$ 为

$$\begin{cases}U_{\text{arm,meas,p}j}=\sum\limits_{k=1}^{N}S_{\text{p}jk}U_{\text{c,meas,p}jk}\\ U_{\text{arm,meas,n}j}=\sum\limits_{k=1}^{N}S_{\text{n}jk}U_{\text{c,meas,n}jk}\end{cases} \tag{18}$$

计算过程中需要的输出相电压、桥臂电流、开关信号等输入量均是MMC调制与均压所需的采样量，因此不需额外增加采样电路。假设第 i 个子模块发生故障，记该子模块电容电压为 $U_{\text{c,meas},xji}$，则测量桥臂电压为

$$\begin{cases}U_{\text{arm,meas,p}j}=\left(\sum\limits_{k=1,k\neq i}^{N}S_{\text{p}jk}U_{\text{c,meas,p}jk}\right)+S_{\text{p}ji}U_{\text{c,meas,p}ji}\\ U_{\text{arm,meas,n}j}=\left(\sum\limits_{k=1,k\neq i}^{N}S_{\text{n}jk}U_{\text{c,meas,n}jk}\right)+S_{\text{n}ji}U_{\text{c,meas,n}ji}\end{cases} \tag{19}$$

将式(17)和式(19)代入式(16)，计算得到桥臂电压偏差为

$$U_{\text{arm,Err},xj}=U_{\text{sm},xji}-S_{xji}U_{\text{c,meas},xji} \tag{20}$$

发生 S_1OC 故障时，代入端口电压式(6)计算桥臂电压偏差 $U_{\text{arm,Err},xj}$，即

$$U_{\text{arm,Err}}=\begin{cases}0 & i_{\text{arm},xj}>0\\ -U_{\text{c,meas},xji}(t) & i_{\text{arm},xj}<0\end{cases} \tag{21}$$

发生 S_2OC 故障时，代入端口电压式(7)计算桥臂电压偏差 $U_{\text{arm,Err},xj}$，即

$$U_{\text{arm,Err}}=\begin{cases}U_{\text{c,real},xji}(t) & i_{\text{arm},xj}>0\\ 0 & i_{\text{arm},xj}<0\end{cases} \tag{22}$$

发生 DF 故障时，代入端口电压式(12)计算桥臂电压偏差 $U_{\text{arm,Err},xj}$，即

$$U_{\text{arm,Err},xj}=\begin{cases}U_{\text{c,real},xji}(t) & i_{\text{arm},xj}>0\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \tag{23}$$

发生 SF 故障时，代入端口电压式(14)计算桥臂电压偏差 $U_{\text{arm,Err},xj}$，即

$$U_{\text{arm,Err},xj}=\begin{cases}\begin{bmatrix}U_{\text{c,real},xji}(t)\\ -U_{\text{c,stuck}}\end{bmatrix} & i_{\text{arm},xj}>0\,\&\,U_{\text{c,stuck}}<U_{\text{c,normal},xji}(t)\\ \begin{bmatrix}U_{\text{c,real},xji}(t)\\ -U_{\text{c,stuck}}\end{bmatrix} & i_{\text{arm},xj}<0\,\&\,U_{\text{c,stuck}}>U_{\text{c,normal},xji}(t)\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \tag{24}$$

发生 GF 故障时，在故障初期，代入端口电压式(13)可计算得到桥臂电压偏差 $U_{\text{arm,Err},xj}$。

若 K_{gain}>1，则 $U_{\text{arm,Err},xj}$ 可表示为

$$U_{\text{arm,Err},xj}=\begin{cases}0 & i_{\text{arm},xj}>0\\ \left(\dfrac{1}{K_{\text{gain}}}-1\right)\times U_{\text{c,meas},xji}(t) & i_{\text{arm},xj}<0\end{cases} \tag{25}$$

若 K_{gain}<1，则 $U_{\text{arm,Err},xj}$ 可表示为

$$U_{\text{arm,Err},xj}=\begin{cases}\left(\dfrac{1}{K_{\text{gain}}}-1\right)\times U_{\text{c,meas},xji}(t) & i_{\text{arm},xj}>0\\ 0 & i_{\text{arm},xj}<0\end{cases} \tag{26}$$

故障检测变量 F_{xj} 为桥臂电压偏差 $U_{\mathrm{arm,Err},xj}$ 在 1 个工频周期内的绝对平均值，在实际的 MMC 故障诊断系统中，滑动求取三相六桥臂故障检测变量 F_{xj}，每次滑动窗口可设置为 1/20 工频周期。当故障检测变量 $F_{xj}>\varepsilon_{\mathrm{F}}$ 时，认定系统发生故障，且故障位置发生在第 j 相、第 x 桥臂。可设置 $\varepsilon_{\mathrm{F}}=10\%\times U_{\mathrm{dc}}/N$，既兼顾故障检测速率及准确率，同时增强系统对直流侧电压波动的鲁棒性，避免故障检测误报与漏报现象的发生。

由式(21)~式(23)可知，当发生 $\mathrm{S_1OC}$、$\mathrm{S_2OC}$ 或 DF 故障时，均能在至多 1 个工频周期内检测到故障发生，并准确定位到故障桥臂。当发生 SF、GF 时，故障检测时间与 $U_{\mathrm{c,stuck}}$、K_{gain} 有关。

2.2 故障定位方法

本节在实现桥臂级故障定位的基础上，以子模块电容电压为观测对象，针对故障桥臂每个子模块建立滑模观测器 SMO(sliding mode observer)，通过对比子模块电容电压的观测值与测量值之间的差异进行故障诊断，并将故障定位到具体子模块。

在 1 个开关周期内对电容电压进行周期平均化，即

$$\frac{\mathrm{d}\bar{U}_{\mathrm{c}xj,k}}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{C_{\mathrm{sm}}}i_{\mathrm{arm}}\bar{S}_{xj,k} \tag{27}$$

式中：$\bar{U}_{\mathrm{c}xj,k}$ 为第 x 相第 j 桥臂第 k 个子模块的电容电压平均值；C_{sm} 为子模块电容；i_{arm} 为桥臂电流；$\bar{S}_{xj,k}$ 为子模块平均开关函数。

建立子模块电容电压观测方程为

$$\frac{\mathrm{d}\tilde{U}_{\mathrm{c},xjk}}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{C_{\mathrm{sm}}}i_{\mathrm{arm}}d_{xjk}-\tau\mathrm{sat}(\tilde{U}_{\mathrm{c},xjk}-U_{\mathrm{c},xjk}) \tag{28}$$

式中：$\tilde{U}_{\mathrm{c}xj,k}$ 为子模块电容电压观测器；d_{xjk} 为等效占空比；τ 为观测增益；$U_{\mathrm{c},xjk}$ 为第 x 相第 j 桥臂第 k 个子模块的电容电压。

MMC 子模块滑模观测器示意如图 12 所示。定义滑模面 $S=\tilde{U}_{\mathrm{c},xjk}-U_{\mathrm{c},xjk}$。将观测器方程减去系统状态方程式(27)得

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}S}{\mathrm{d}t}=-\tau\mathrm{sat}(S)\\ \mathrm{sat}(S)=\begin{cases}-1 & S<-h\\ S/h & -h<S<h\quad h>0\\ 1 & S>h\end{cases}\end{cases} \tag{29}$$

式中，h 为饱和函数宽度。

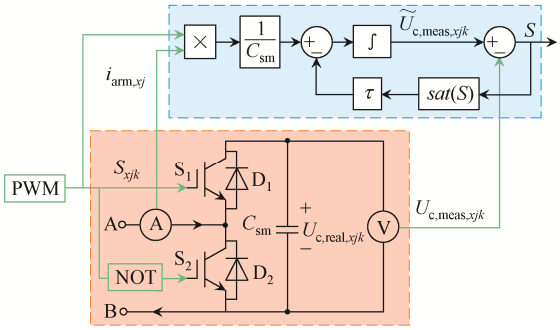


图 12　MMC 子模块滑模观测器示意

Fig. 12 Schematic of sliding mode observer of MMC SM

选取 $V=0.5\times S^{\mathrm{T}}S$ 为李雅普诺夫函数，则其导数为

$$\dot{V}=S^{\mathrm{T}}\dot{S}=-\tau S\mathrm{sat}(S) \tag{30}$$

由式(30)可知，当 $\tau>0$ 时，其导数小于 0 恒成立，即保证滑模观测器在系统正常运行时观测误差可收敛到 0。当滑模观测器受到小扰动时，此时 $\mathrm{sat}(S)=S/h$，代入式(29)可求解得到

$$S(t)=S(0)\mathrm{e}^{-\frac{\tau}{h}t} \tag{31}$$

式(31)表明若滑模观测器由于小扰动出现偏差初值 $S(0)$，则其以指数规律进行衰减，衰减速度由参数 τ/h 决定。

2.3 故障诊断流程

综上所述，所设计故障诊断流程如图 13 所示。其中，故障检测环节通过比较桥臂电压实际值与测量值之间的偏差来检测 MMC 系统是否发生故障，并将故障定位到桥臂级。故障定位环节则位于子控制器内，针对故障桥臂内子模块电容电压建立滑模观测器，通过对比观测值和测量值进而将故障定位到具体子模块。

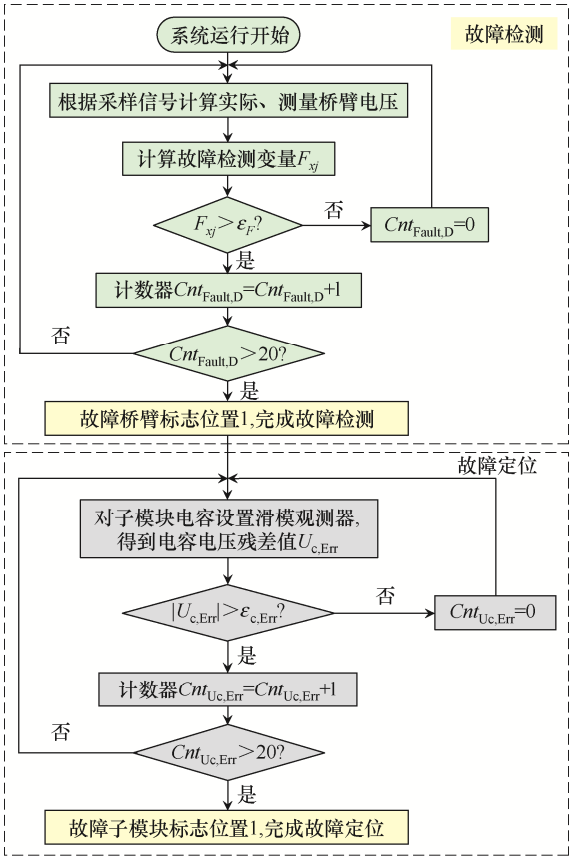


图 13 故障诊断流程

Fig. 13 Flow chart of fault diagnosis

3 验证与讨论

为验证故障诊断策略的有效性，本文在Simulink环境中搭建了MMC系统模型，模型的详细参数见表1。

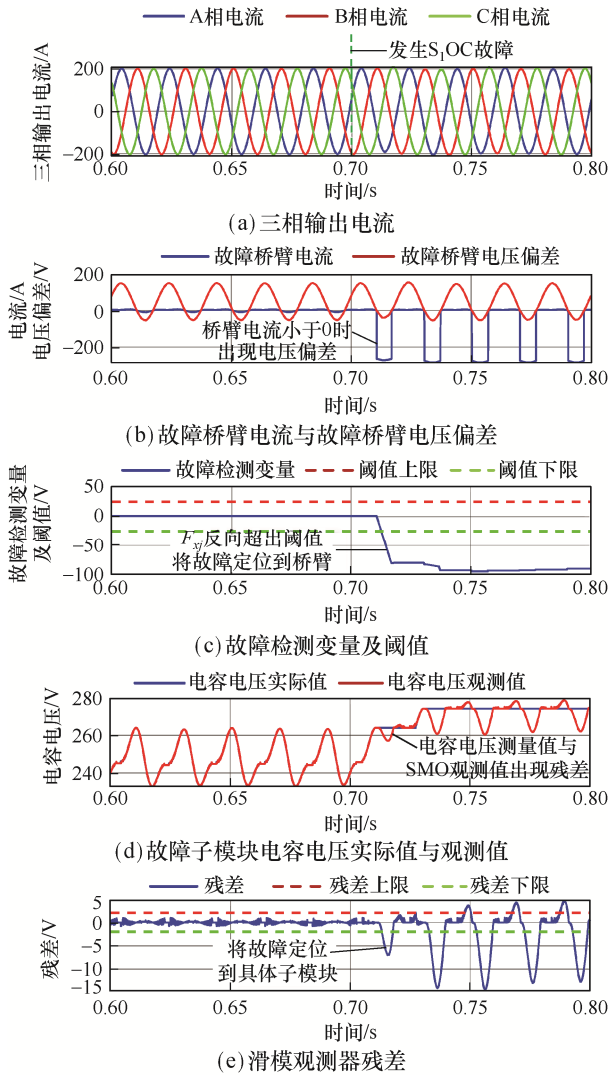
表 1 MMC 仿真模型参数

Tab. 1 Parameters of MMC simulation model

参数	数值
电网电压频率/Hz	50
直流侧额定电压/V	5 500
交流侧额定电压/V	3 300
子模块电容/mF	7
子模块电容电压额定值/V	250
桥臂电感/mH	13.5
网侧滤波电感/mH	13.58
单个桥臂的子模块数	22
滑模观测器参数 h	0.1
滑模观测器参数 τ	3 000

3.1 IGBT 开路故障仿真验证

图14和图15分别为MMC系统子模块的S_1OC故障、S_2OC故障诊断示意。其中图14(a)和图15(a)为三相输出电流，图14(b)和图15(b)为故障子模块所在的桥臂电流与故障桥臂电压偏差值。图14(b)中在桥臂电流为负时，出现桥臂电压负向偏差值，符合式(21)，图15(b)在桥臂电流为正时，出现桥臂电压正向偏差值，符合式(22)。



(a) 三相输出电流

(b) 故障桥臂电流与故障桥臂电压偏差

(c) 故障检测变量及阈值

(d) 故障子模块电容电压实际值与观测值

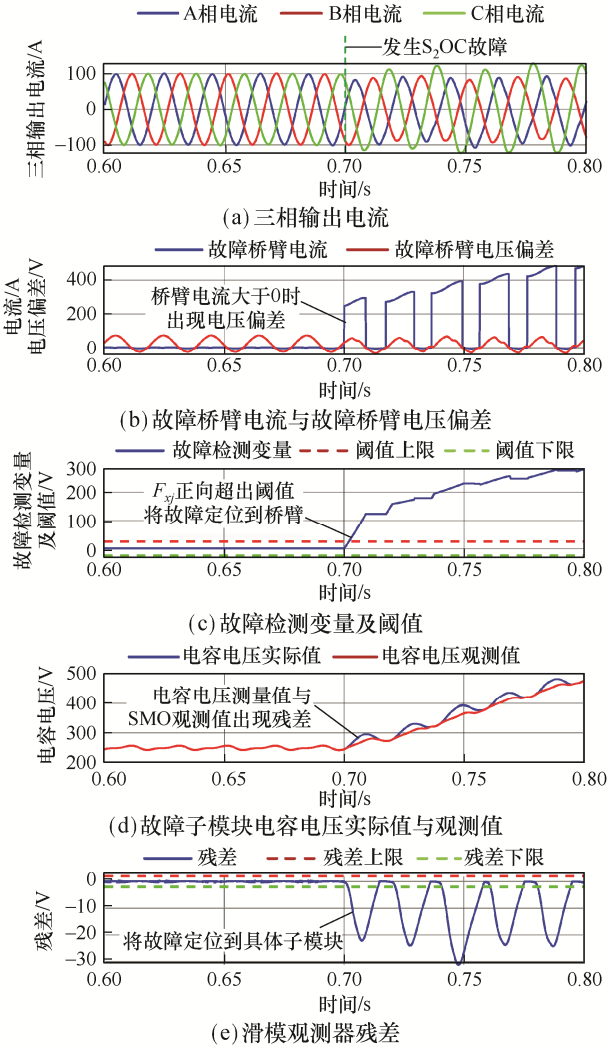
(e) 滑模观测器残差

图 14 S_1OC 故障仿真示意

Fig. 14 Schematic of simulation under S_1OC fault

图14(c)和图15(c)为故障检测变量及阈值，在发生S_1OC、S_2OC故障后，故障检测变量F_{xj}分别反偏、正偏并超出阈值，将故障定位到具体桥臂。

图14(d)和图15(d)为故障子模块电容电压测量值与观测值，图14(d)中在$i_{arm,xj}$为负时，电容电压



(a) 三相输出电流

(b) 故障桥臂电流与故障桥臂电压偏差

(c) 故障检测变量及阈值

(d) 故障子模块电容电压实际值与观测值

(e) 滑模观测器残差

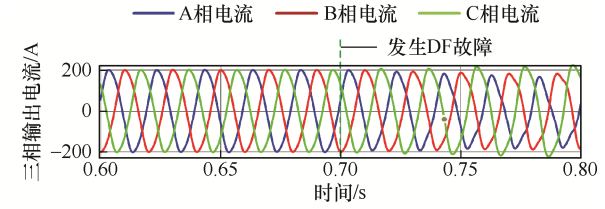
图 15　S_2OC 故障仿真示意

Fig. 15 Schematic of simulation under S_2OC fault

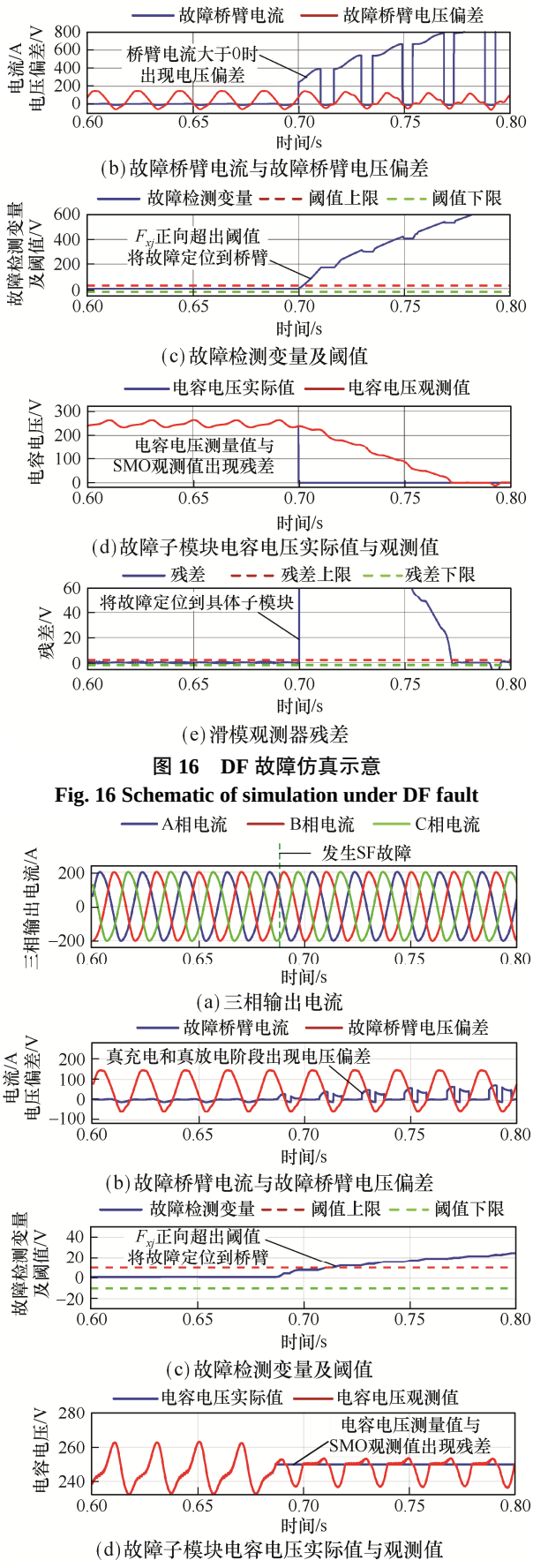
的测量值与滑模观测器的估计值出现残差，图 15(d)则在 $i_{\mathrm{arm},xj}$ 为正时出现残差值。图 14(e)和图 15(e)为子模块电容电压残差值及阈值，2 种 IGBT 开路故障分别在故障后第 1 个放电、充电周期内，残差值超出阈值下限，将故障定位到具体子模块。

3.2　子模块电压传感器故障仿真验证

图 16~图 18 分别为 MMC 系统子模块发生 DF、SF、GF 时的故障诊断示意，K_{gain}=1.5。



(a) 三相输出电流



(b) 故障桥臂电流与故障桥臂电压偏差

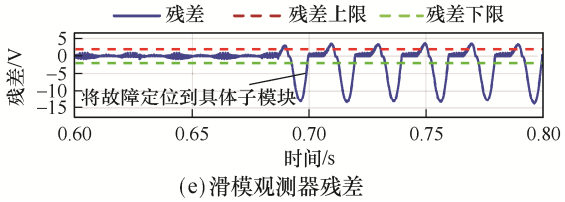
(c) 故障检测变量及阈值

(d) 故障子模块电容电压实际值与观测值

(e) 滑模观测器残差

图 16　DF 故障仿真示意

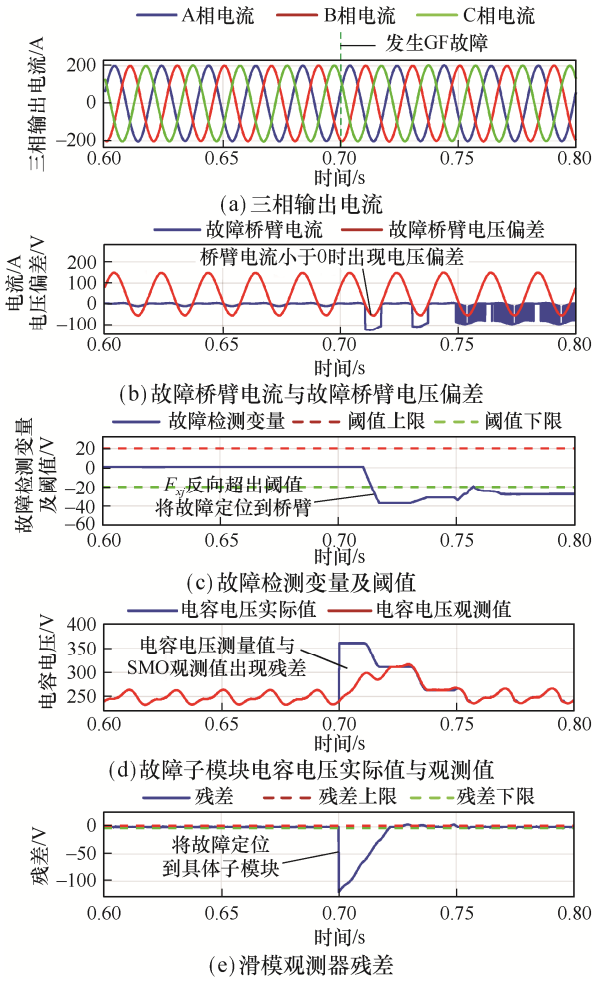
Fig. 16 Schematic of simulation under DF fault



(e)滑模观测器残差

图 17 SF 故障仿真示意

Fig. 17 Schematic of simulation under SF fault



(a)三相输出电流

(b)故障桥臂电流与故障桥臂电压偏差

(c)故障检测变量及阈值

(d)故障子模块电容电压实际值与观测值

(e)滑模观测器残差

图 18 GF 故障仿真示意

Fig. 18 Schematic of simulation under GF fault

图16(b)中发生 DF 故障时，在桥臂电流为正时，出现桥臂电压正向偏差值，符合式(23)；图 17(b)中发生 SF 故障时，在真充电阶段，桥臂电压出现正偏差值，在真放电阶段，出现负偏差值，符合式(24)；图 18(b)中 GF 故障初期，在桥臂电流为负时出现负向桥臂电压偏差值，符合式(25)。

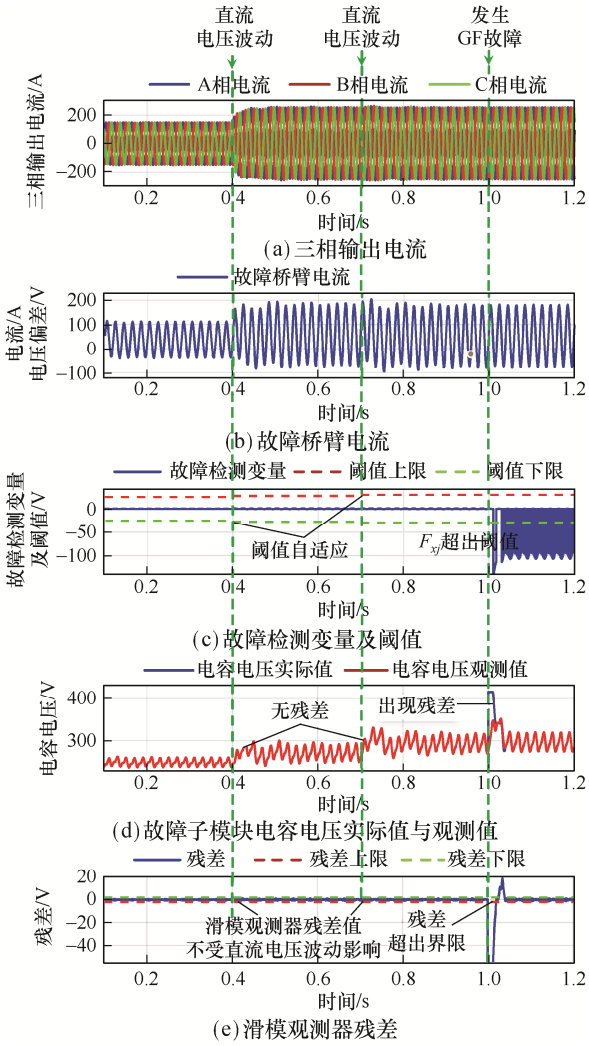
DF 故障后，F_{xj}正向超出阈值，如图 16(c)所示；SF 故障后，其 F_{xj}的正负与卡死时刻的值 $U_{c,stuck}$有关，如图 17(c)所示；GF 故障且 K_{gain}>1 时，F_{xj}反向超出阈值，如图 18(c)所示，将故障定位到具体桥臂。

图 16(d)中 DF 故障时，在整个周期内，电容电压的测量值与滑模观测器的估计值出现残差；图 17(d)中 SF 故障时，在真充电阶段和真放电阶段，电容电压的测量值与滑模观测器的估计值出现残差；图 18(d)中 GF 故障时，在故障初期的整个周期内出现残差。3 种电压传感器故障均在故障后第一个周期内将故障定位到具体的子模块。

由上述分析可知，本故障诊断策略可同时针对子模块 IGBT 开路故障和电压传感器典型故障进行故障检测与故障定位，且针对子模块 IGBT 故障、电压传感器断开故障，其故障检测时间不超过 1 个工频周期。

3.3 故障诊断策略鲁棒性验证

图 19 为直流电压波动时系统发生子模块故障时



(a)三相输出电流

(b)故障桥臂电流

(c)故障检测变量及阈值

(d)故障子模块电容电压实际值与观测值

(e)滑模观测器残差

图 19 直流电压波动时 GF 故障诊断示意

Fig. 19 Schematic of GF fault diagnosis under DC voltage fluctuation

的诊断示意。直流电压分别在0.4 s时刻由 5 500 V 提升至 6 000 V，在 0.7 s 时继续由 6 000 V 提升至 6 500 V，在 1.0 s 时刻发生了 GF 故障。

由仿真结果可以发现，故障检测变量 F_{xj} 及滑模观测器残差值在直流电压波动情况下均未超出阈值出现误判现象，在 1.0 s 时刻发生故障后迅速超出阈值并精准定位故障。仿真结果表明，该故障诊断方法在直流电压波动工况下具有鲁棒性。

图 20 为负载突变时系统发生子模块故障时的故障诊断示意。负载功率分别在 0.4 s 时刻由 1.2 MW 降低至 0.8 MW，在 0.7 s 时继续降低至 0.4 MW，在 1.0 s 时刻发生了 S_2OC 故障。

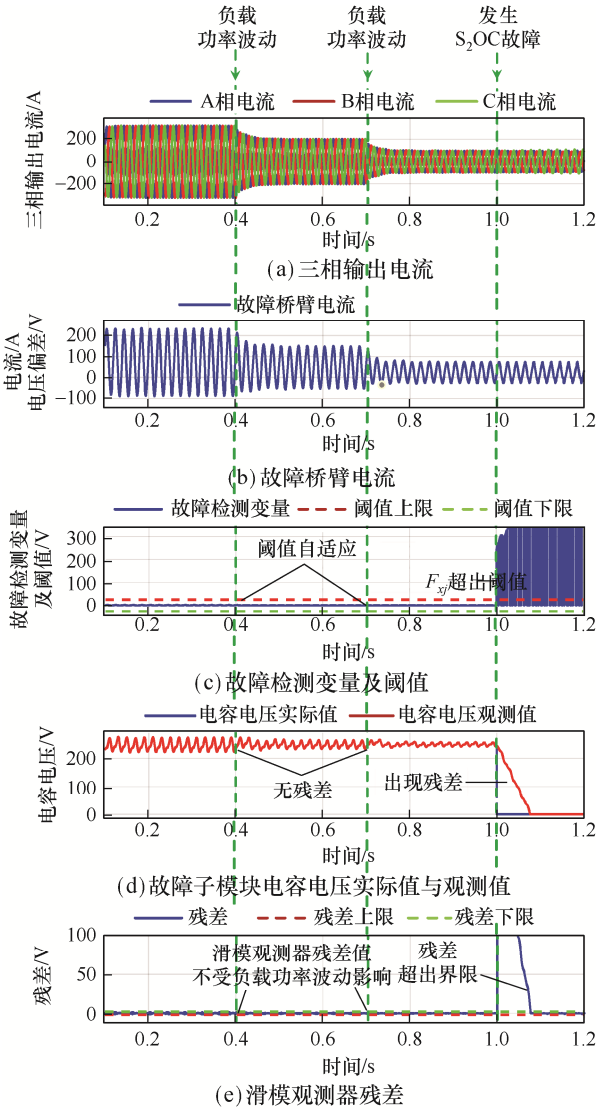


图 20　负载功率波动时 S_2OC 故障诊断示意

Fig. 20 Schematic of S_2OC fault diagnosis under load power fluctuation

由仿真结果可以发现，故障检测变量 F_{xj} 及滑模观测器残差值在负载突变情况下均未超出阈值出现误判现象，在发生故障后迅速超出阈值并精准定位故障。仿真结果表明，本文提出的故障诊断方法在负载突变工况下仍然具有鲁棒性。

4　结论

本文研究了 MMC 子模块 2 类 IGBT 开路故障与 3 类电压传感器的典型故障，详细对比了其故障特征，提出了针对 IGBT 开路故障和电压传感器典型故障的联合诊断方法，通过理论分析和仿真验证得到如下结论。

(1)故障检测环节利用桥臂实际电压与桥臂测量电压生成故障检测变量，与阈值进行对比，从而将故障定位到桥臂级，兼顾了故障检测速率及准确率，同时也增强了系统鲁棒性。

(2)故障定位环节采用滑模观测器对故障桥臂子模块电容电压进行观测，具有较强的抗干扰能力，运算简单。

(3)相较于传统故障诊断算法，本诊断策略可同时实现对 IGBT 开路故障和电压传感器典型故障的联合故障诊断与定位，且从理论上计算出了故障检测环节中各类故障的桥臂电压偏差值，便于故障阈值的计算与设计。

(4)针对 IGBT 开路故障与电压传感器断开故障，本诊断策略可以在 20 ms 内实现快速故障诊断与定位。

参考文献：

[1] Lesnicar A, Marquardt R. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range [C]// 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings. Bologna, Italy, 2004, 3: 6.

[2] 付华，张辉. 基于故障电流特征的多端柔性直流电网故障识别[J]. 电源学报, 2025, 23(5): 174-184.
Fu Hua, Zhang Hui. Fault identification of multi-terminal MMC-HVDC grid based on fault current characteristics [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(5): 174-184. (in

Chinese)

[3] 陈阳, 王晗, 朱淼, 等. 基于混合子模块与全桥臂电感的三端口模块化多电平变流器: 简化建模与电网互联控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(5): 1641-1657.
Chen Yang, Wang Han, Zhu Miao, et al. Three-port MMC with hybrid submodules and full arm inductor scheme: Simplified modeling and grid interconnection control strategy [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(5): 1641-1657. (in Chinese)

[4] 任强, 孙驰, 肖飞, 等. 模块化多电平 DC-DC 变换器研究综述[J]. 电源学报, 2017, 15(4): 48-59.
Ren Qiang, Sun Chi, Xiao Fei, et al. Review of modular multilevel DC-DC converter [J]. Journal of Power Supply, 2017, 15(4): 48-59. (in Chinese)

[5] 陈阳, 王晗, 朱淼, 等. 具有直流电压极性反转能力的双交流端口模块化多电平换流器[J]. 高电压技术, 2022, 48(3): 980-992.
Chen Yang, Wang Han, Zhu Miao, et al. Dual-AC-port modular multilevel converter with DC polarity reversal ability [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3): 980-992. (in Chinese)

[6] 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, 2015, 30(5): 2517-2533.

[7] 马燕君, 谭令其, 马凯, 等. 半桥型 MMC-HVDC 子模块故障诊断与定位方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(11): 4600-4609.
Ma Yanjun, Tan Lingqi, Ma Kai, et al. A fault detection and location method for sub-module in half-bridge MMC-HVDC transmission system [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4600-4609. (in Chinese)

[8] 江友华, 陈芳, 赵乐, 等. 不平衡电网电压条件下 MMC 控制策略综述[J]. 电源学报, 2023, 21(4): 74-87.
Jiang Youhua, Chen Fang, Zhao Le, et al. Review of control strategies for modular multilevel converter under unbalanced grid voltage [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(4): 74-87. (in Chinese)

[9] 于飞, 王子豪, 刘喜梅. 新型模块化多电平换流器的设计与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(1): 69-77.
Yu Fei, Wang Zihao, Liu Ximei. A gradationally contr-olled modular multilevel converter and its application [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(1): 69-77. (in Chinese)

[10] 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.

[11] 杨贺雅, 邢纹硕, 陈聪, 等. 基于随机森林二分类器的模块化多电平换流器子模块开路故障检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(10): 3916-3928.
Yang Heya, Xing Wenshuo, Chen Cong, et al. A fault detection and location strategy for sub-module open-circuit fault in modular multilevel converters based on random forest binary classifier [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(10): 3916-3928. (in Chinese)

[12] 李翠, 刘振兴, 柴利, 等. 模块化多电平换流器的子模块开路故障检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23): 6995-7003, 7091.
Li Cui, Liu Zhenxing, Chai Li, et al. An open circuit fault detection method for sub-modules in modular multi-level converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 6995-7003, 7091. (in Chinese)

[13] 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): 9297-9310.
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): 9297-9310. (in Chinese)

[14] Deng Fujin, Jin Ming, Liu Chengkai, et al. Switch open-circuit fault localization strategy for MMCs using sliding-time window based features extraction algorithm [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(10): 10193-10206.

[15] Wang Lianqiang, Zhang Li, Xiong Yongsheng, et al. Multi-point open circuit faults diagnosis strategy of modular multilevel converter under low modulation index [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(7): 7886-7895.

[16] 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, 2023, 38(3): 3899-3916.

[17] Jin Yu, Xiao Qian, Jia Hongjie, et al. A novel detection and localization approach of open-circuit switch fault for the grid-connected modular multilevel converter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(1): 112-124.

[18] 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).

[19] 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)

[20] Xu Kunshan, Xie Shaojun, Yan Ye, et al. A fast fault diagnosis method for submodule failures in modular multilevel converters [C]// 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Cincinnati, OH, USA, 2017: 1125-1130.

[21] Liu Hui, Ma Ke, Loh P C, et al. Online fault identification based on an adaptive observer for modular multilevel converters applied to wind power generation systems [J]. Energies, 2015, 8(7): 7140-7160.

[22] 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.

[23] Gou Bin, Xu Yan, Xia Yang, et al. An intelligent time-adaptive data-driven method for sensor fault diagnosis in induction motor drive system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(12): 9817-9827.

[24] 许水清，许晓凡，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关管和电流传感器故障诊断[J]. 电工技术学报, 2024, 39(13): 4066-4078.
Xu Shuiqing, Xu Xiaofan, He Yigang, et al. A diagnosis method for power switch and current sensor faults in grid-connected three-level neutral-point clamped inverters based on adaptive sliding mode observer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(13): 4066-4078. (in Chinese)

[25] Gou Bin, Xu Yan, Xia Yang, et al. An online data-driven method for simultaneous diagnosis of IGBT and current sensor fault of three-phase PWM inverter in induction motor drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(12): 13281-13294.

[26] Xu Shuiqing, Xu Xiaofan, Du Haibo, et al. Comprehensive diagnosis strategy for power switch, grid-side current sensor, DC-link voltage sensor faults in single-phase three-level rectifiers [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2024, 71(7): 3343-3356.

[27] Xu Shuiqing, Chen Xinyang, Liu Feng, et al. A novel adaptive SMO-based simultaneous diagnosis method for IGBT open-circuit faults and current sensor incipient faults of inverters in PMSM drives for electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 3526915.



刘靖伟

作者简介：

刘靖伟(1999—)，男，硕士研究生。研究方向：MMC 系统故障诊断。E-mail：liujingwei@sjtu.edu.cn。

马建军(1992—)，男，中国电源学会会员，博士，助理教授。研究方向：电力电子化电力系统，新能源并网。E-mail：j.j.ma@sjtu.edu.cn。

陈阳(1990—)，男，博士，高级工程师。研究方向：模块化多电平换流器，柔性输电关键技术。E-mail：chenyang-cn@163.com。

朱淼(1979—)，男，通信作者，博士，教授。研究方向：新能源并网，混合交直流功率变换，柔性交直流输配电。E-mail：miaozhu@sjtu.edu.cn。

文书礼(1987—)，男，博士，副教授。研究方向：移动式微电网，储能优化配置，深度学习与智能算法。E-mail：wenshuli@sjtu.edu.cn。

(责任编辑：耿越)