DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.5.198 **中图分类号**：TM721.2 **文献标志码**：A

基于分布式限流模块的 MMC-UPFC 故障穿越策略

刘国峰[1]，兰 岚[1]，武 鸿[2](中国电源学会学生会员)，刘 泳[1]，
张天艺[2](中国电源学会学生会员)，王南勤[1]
(1.国网江苏省电力有限公司南京供电分公司，南京 210019；2.电工材料电气绝缘全国重点实验室(西安交通大学)，西安 710049)

摘要：模块化多电平换流器-统一潮流控制器 MMC-UPFC(modular multilevel converter-unified power flow controller)在其所在交流系统发生短路故障时，串、并联侧 MMC 均会受到故障影响而过流闭锁，导致 MMC-UPFC 完全退出运行。针对此，首先分析了 MMC-UPFC 所在交流系统短路故障时的故障特性，明确了并联侧 MMC 过流闭锁的主要原因。在此基础之上，提出了一种基于分布式限流模块的 MMC-UPFC 故障穿越策略，详细分析了该策略的工作原理，并给出了其参数设置的原则。所提故障穿越策略通过在故障期间接入限流电阻，能够有效抑制直流母线电流，进而保证故障期间并联侧 MMC 不过流闭锁，能够继续发出无功功率。最后，通过 MATLAB/Simulink 仿真验证了所提故障穿越策略的有效性和参数设置原则的合理性。

关键词：统一潮流控制器；模块化多电平换流器；故障穿越；分布式限流模块

MMC-UPFC Fault Ride-through Strategy Based on Distributed Current Limiting Modules

LIU Guofeng[1], LAN Lan[1], WU Hong[2], *Student Member*, *CPSS*, LIU Yong[1],
ZHANG Tianyi[2], *Student Member*, *CPSS*, WANG Nanqin[1]
(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd,. Nanjing Power Supply Branch Company, Nanjing 210019, China; 2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an 710049, China)

Abstract: In the event of a short-circuit in the AC system where the modular multilevel converter-unified power flow controller (MMC-UPFC) is located, both the series and shunt-side MMCs will be impacted by the fault and be blocked due to overcurrent, leading to the complete shutdown of the MMC-UPFC. The fault characteristics of the AC system where the MMC-UPFC is located are analyzed. It clarifies the main reasons for the overcurrent blocking of the shunt-side MMC. Based on this analysis, a fault ride-through strategy for MMC-UPFC is proposed, which is based on a distributed current limiting module. The working principle of this strategy is analyzed in detail, and the guidelines of its parameter tuning are given. The proposed fault ride-through strategy can effectively suppress the DC bus current by inserting a current limiting resistor during the fault period. This ensures that the shunt-side MMC is not blocked during the fault period, allowing it to continue generating reactive power. Finally, simulations in MATLAB/Simulink are used to verify the effectiveness of the proposed fault ride-through strategy and the correctness of the parameter tuning guidelines.

收稿日期：2024-03-20；**修回日期**：2024-04-17；**录用日期**：2024-04-30；**网络首发日期**：2024-05-13
基金项目：国网江苏省电力有限公司科技资助项目(J2023001)
This work is supported by the Science and Technology Project of Jiangsu Electric Power Co., Ltd., under the grant J2023001

Keywords: Unified power flow controller (UPFC); modular multilevel converter (MMC); fault ride-through; distributed current limiting module

柔性交流输电技术 FACTS(flexible alternating

current transmission systems)是指装有电力电子型或其他静止型控制器以加强系统可控性和增加功率传输能力的交流输电系统[1-6]。统一潮流控制器 UPFC(unified power flow controller)作为第三代 FACTS 设备，能够灵活可靠地改善交流电网潮流分布、增强无功支撑，提高电力系统稳定性和输电能力，对建设智能电网具有重要意义[7-9]。模块化多电平换流器 MMC(modular multilevel converter)因其模块化结构及可拓展性等优势，已成为当下 UPFC 的主流拓扑结构，目前已应用于多个实际工程[10-13]。

目前有关模块化多电平换流器–统一潮流控制器 MMC-UPFC(modular multilevel converter-unified power flow controller)故障保护的方向多集中在接地方式、故障特性及保护配置等方面，对于其故障穿越策略的研究较少。文献[14]研究了 MMC-UPFC 装置中不同接地方式对本体内部故障特性与保护配置的影响，但并未涉及外部交流系统故障；文献[15]分析了 MMC-UPFC 单相接地故障下的故障特性，并给出了整体保护的配置方案；文献[16]提出了一种基于分裂电感的新型限流式 MMC-UPFC，能够有效限制晶闸管旁路开关 TBS(thyristor bypass switch)导通后的故障电流，但并未考虑 TBS 导通前的情形。

当交流系统发生短路故障时，短路电流将通过串联变压器耦合至阀侧，迅速导致串联侧 MMC 的过流闭锁，由于 TBS 的导通存在固有延时[17]，在串联侧 MMC 到 TBS 导通的这段时间内，短路电流仍可通过闭锁的串联侧 MMC 经直流母线持续馈入至并联侧 MMC，导致并联侧 MMC 存在过流闭锁的风险。由于并联侧 MMC 实质上是作为静止同步补偿器 STATCOM(static synchronous compensator)运行，在故障发生时，能够提供无功功率，可在一定程度上维持并网点电压，因此为充分发挥其功能，应避免故障期间并联侧 MMC 闭锁，使其继续运行[18]。文献[18]提出了一种基于限流电抗器的 MMC-UPFC 故障穿越策略，这种故障穿越策略实现简便且具备较强的故障穿越能力，但由于在直流母线上接入了限流电抗器，会对系统的动态响应速度产生影响，不利于系统的潮流调节；文献[19]在文献[18]的基础上，提出了一种基于虚拟限流电抗器的 MMC-UPFC 故障穿越策略，该策略将限流电抗器的物理特性用数学表达式表示，基于该表达式对并联侧 MMC 的电压外环进行改进，这种故障穿越策略无需额外的硬件，但故障穿越能力弱，仅适用于故障不严重的应用场景，对于三相接地等严重故障无法穿越。

本文首先简要介绍了 MMC-UPFC 的拓扑结构及控制策略，并对 MMC-UPFC 接入交流母线故障下的故障特性进行了详细分析，明确了并联侧 MMC 闭锁的主要原因。在此基础之上，本文提出了基于分布式限流模块 DCLM(distributed current limiting module)的 MMC-UPFC 故障穿越策略，详细分析了其工作原理并讨论了相关参数的设置原则。所提故障穿越策略在故障发生时可通过投入限流电阻，抑制直流母线电流上升，进而实现并联侧 MMC 不闭锁的故障穿越目标。对比现有故障穿越策略，所提故障穿越策略通过合理地设置相关参数，能够具备较强的故障穿越能力，并通过对 DCLM 的主动控制避免了对系统动态响应时间的影响。基于 MATLAB/Simulink 的仿真结果验证了所提故障穿越策略的有效性和参数设置的合理性。

1　MMC-UPFC 拓扑结构

MMC-UPFC 的拓扑结构如图 1 所示，其中串联侧 MMC 经串联变压器串入交流母线中，与 Q 侧交流母线相连，并联侧 MMC 经并联变压器并入交流母线中，与 P 侧交流母线相连，串、并联侧 MMC 通过直流母线以背靠背方式连接。图中：Z_S 为 P 侧系统的等效阻抗；Z_L 为 Q 侧系统的等效阻抗；T_1 和 T_2 为绝缘栅双极型晶体管 IGBT(insulated gate bipolar transistor)；D_1 和 D_2 为反并联二极管；$I_{dc,P}$ 和 $I_{dc,N}$ 分别为正极直流母线电流和负极直流母线电流，二者正参考方向已在图 1 中标出。

TBS 以并联形式接入串联变压器低压侧绕组

两侧，其作用是在串联侧 MMC 过流闭锁后，触发导通，将串联侧 MMC 旁路，避免 MMC-UPFC 受到交流系统故障影响。值得注意的是，TBS 的导通与串联侧 MMC 的闭锁间存在固有延时 t_d，一般为 3~5 ms[18-19]。高压侧旁路断路器 HVB(high voltage breaker)和低压侧旁路断路器 LVB(low voltage breaker)在串联侧 MMC 闭锁后 40 ms 内合闸，MMC-UPFC 退出运行。

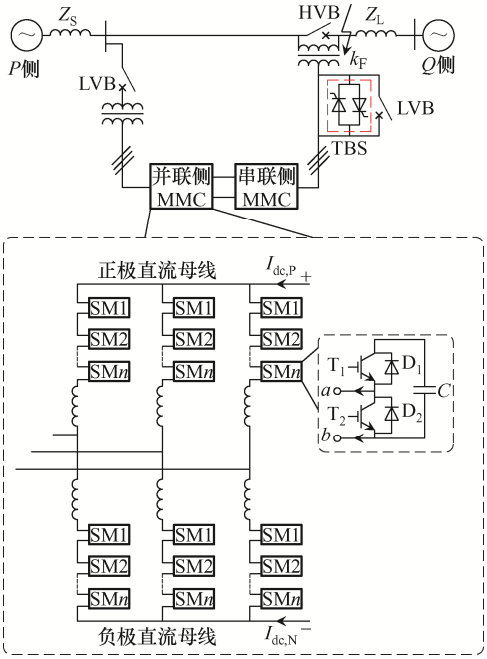


图 1 MMC-UPFC 拓扑

Fig. 1 Topology of MMC-UPFC

参照国内某 220.0 kV MMC-UPFC 参数，在 MATLAB/Simulink 中搭建如图 1 所示的仿真模型，仿真参数见表 1，t_d 设置为 5 ms。

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

参数	数值
换流器容量/MVA	60
额定直流电压/kV	±20
并联变压器容量/MVA	60
串联变压器额定电压/kV	26.5/20.8
并联变压器额定电压/kV	220.0/20.8
桥臂电抗/mH	8
变压器接地电阻/Ω	500
子模块电容/μF	11 000

2 交流母线故障下 MMC-UPFC 的故障特性

2.1 MMC-UPFC 故障现象

串、并联侧 MMC 的过流保护值均设置为 1.28 kA。在图 1 所示的 k_F 处设置三相短路故障，k_F 点与 Q 侧系统的距离为 99%的线路长度，故障时刻 t_0 设置为 4.0 s，持续时间设置为 0.5 s，仿真波形如图 2 所示。图中：t_1 为串联侧 MMC 闭锁时刻；t_2 为并联侧 MMC 闭锁时刻；t_3 为 TBS 导通时刻。

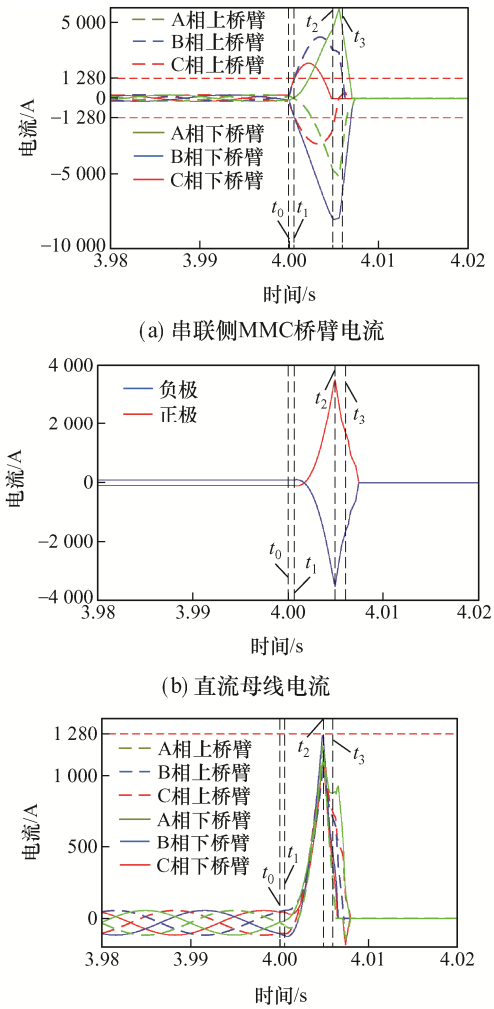


图 2 k_F 点发生三相短路故障时的仿真波形

Fig. 2 Simulation waveforms when three-phase short-circuit fault occurs at point k_F

由图 2 可见，在故障发生后，短路电流通过串联变压器耦合至阀侧，串联侧 MMC 桥臂电流迅速上升，超出过流保护值，导致串联侧 MMC 于 t_1 时刻过流闭锁。由于串联侧 MMC 的闭锁与 TBS 的导通存在固有延时 t_d，因而在 TBS 导通前，短路电流仍可通过直流母线持续馈入并联侧 MMC，最终导致并联侧 MMC 于 t_2 时刻过流闭锁；在 TBS 导通后，串联侧桥臂电流、直流母线电流及并联侧桥臂电流均快速下降至 0。

2.2 MMC-UPFC 故障特性分析

根据第 2.1 节中的故障现象，MMC-UPFC 接入交流母线故障期间的时序图如图 3 所示。由于从故障发生到串联侧 MMC 过流闭锁的时间较短，而从串联侧 MMC 过流闭锁到并联侧 MMC 过流闭锁的时间较长，因此重点对 t_1 到 t_2 间的故障特性进行分析。t_1 到 t_2 间故障电流通路如图 4 所示，图中：U_S 为并联侧等效电压源；I_{dc} 为直流母线故障电流；R_{eq}、L_{eq} 和 C_{eq} 分别为并联侧 MMC 等值电阻、电感和电容，组成并联侧等值电路。从图 4 中可以看出，各相上、下桥臂存在电容充电或短路 2 种状态，对于处于短路状态的桥臂，阀侧故障电流经半桥子模块 HBSM(half bridge sub-module)的 D_2 馈入直流母线；对于处于充电状态的桥臂，阀侧故障电流经

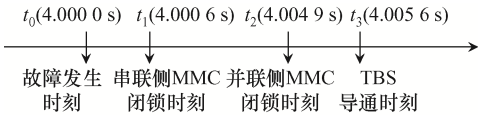


图 3　MMC-UPFC 故障时序图

Fig. 3 Schematic of MMC-UPFC fault timing sequence

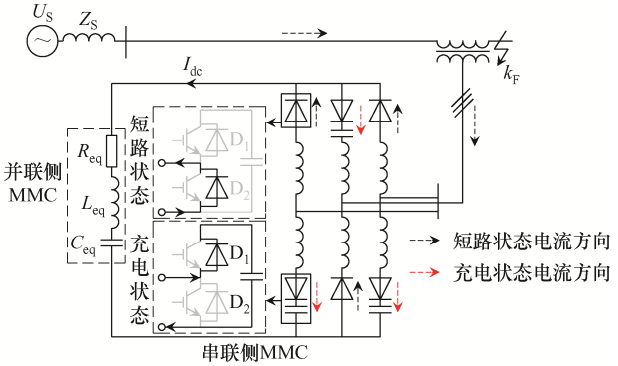


图 4　t_1 至 t_2 期间故障电流通路

Fig. 4 Fault current path between t_1 and t_2

HBSM 的 D_1 给电容充电。结合图 2(b)可以看出，从故障发生到并联侧 MMC 闭锁，直流母线电流一直不断增大。

由于故障穿越的目的是避免故障期间并联侧 MMC 过流闭锁，因此在上述分析的基础之上，对并联侧 MMC 的桥臂电流进行深入分析。根据文献[1]，并联侧 MMC 上桥臂电流 i_{jp} 和下桥臂电流 i_{jn} 满足

$$\begin{cases} i_{jp} = I_{dc}/3 + i_j/2 \\ i_{jn} = I_{dc}/3 - i_j/2 \end{cases} \tag{1}$$

式中，i_j 为 MMC 的 j 相阀侧输出电流。

根据式(1)可知，MMC 的桥臂电流与直流母线电流和阀侧输出电流均相关。由图 2(b)可见，当并联侧 MMC 桥臂电流达到 1 280 A 的保护值时，I_{dc}= 3 514 A，代入式(1)可知，此时并联侧 MMC 桥臂电流中直流组分为 1 171 A，占比 91.5%，说明并联侧MMC过流闭锁的主要原因是直流母线电流过大。因此，为保证并联侧 MMC 不发生过流闭锁，重点在于抑制直流母线电流的上升。

3　基于分布式限流模块的MMC-UPFC故障穿越策略

3.1 故障穿越策略的工作原理

为了避免故障期间并联侧 MMC 过流闭锁，关键在于抑制直流母线电流的上升。因此，本文提出基于分布式限流模块的 MMC-UPFC 故障穿越策略。加入分布式限流模块的 MMC-UPFC 主电路拓扑如图 5 所示，多个相同的 DCLM 以串联方式连接，接入到正极直流母线中。单个 DCLM 由 1 个二极管 D、1 个 IGBT T 和 1 个限流电阻 R 并联构成。

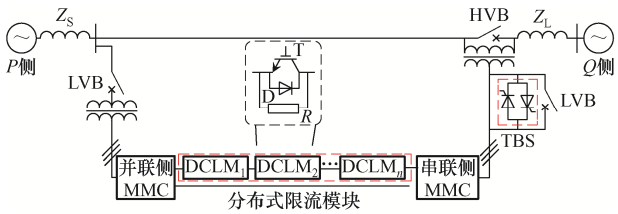


图 5　加入分布式限流模块的 MMC-UPFC 主电路拓扑

Fig. 5 Main circuit topology of MMC-UPFC with DCLMs

当无故障发生时，正极直流母线电流较小，未超出设定的限流电阻投入阈值 I_{in}，控制所有 IGBT 的驱动信号为高，此时 IGBT 和二极管相当于 1 个双向导通开关，能够根据正极直流母线电流方向实现双向通流。具体而言，若有功功率的传输方向为串联侧传向并联侧，即正极直流母线电流方向为串联侧流向并联侧，则通过 DCLM 中的 IGBT 实现通流，所有限流电阻均被旁路；若有功功率的传输方向为并联侧传向串联侧，即正极直流母线电流方向为并联侧流向串联侧，则通过 DCLM 中的二极管实现通流，所有限流电阻同样均被旁路。

当有故障发生时，直流母线电流不断增大，且正极直流母线电流方向为串联侧流向并联侧，此时 DCLM 中的 IGBT 起到通流的作用。当 $I_{dc,p}$ 超出 I_{in} 时，控制所有 IGBT 的驱动信号为低，DCLM 中的 IGBT 均被关断，限流电阻将被接入正极直流母线，抑制直流母线电流的增大。在 TBS 导通后，直流母线电流减小，当 $I_{dc,p}$ 低于设定的限流电阻切除阈值 I_{out} 时，控制所有 IGBT 的驱动信号为高，DCLM 中的 IGBT 将重新导通，所有限流电阻将重新被旁路。

从上述分析可以看出，本文提出的基于分布式限流模块的 MMC-UPFC 故障穿越策略在无故障发生时，控制所有 IGBT 的驱动信号都为高，可根据有功功率传输方向分别由 DCLM 中的 IGBT 和二极管实现通流，主电路拓扑与未加入分布式限流模块的拓扑一致，因此不会对系统的潮流调节时间产生影响；在有故障发生时，通过关断 DCLM 中的 IGBT，DCLM 中的限流电阻可被接入正极直流母线，能够有效抑制直流母线电流增大，进而保证故障期间并联侧 MMC 不闭锁，实现预定的故障穿越目标。

3.2 故障穿越策略的控制方法

根据第 3.1 节中的分析，所提故障穿越策略在无故障发生时应使所有 IGBT 都导通，旁路掉所有 DCLM 中的限流电阻；在有故障发生时应切除 IGBT，接入 DCLM 中限流电阻，抑制直流母线电流增大。基于此，可提出所提故障穿越策略的控制方法，如图 6 所示。

由图 6 可见，第一部分是限流电阻投入值 I_{in} 和限流电阻切除值 I_{out} 的计算，具体计算方法可表示为

$$\begin{cases} I_{in} = I_{based} \\ I_{out} = I_{based} - I_{hl} \end{cases} \tag{2}$$

式中：I_{based} 为设置的直流母线基准值；I_{hl} 为设置的投切滞环值，I_{hl} 的存在能够避免 DCLM 不必要的反复投切。

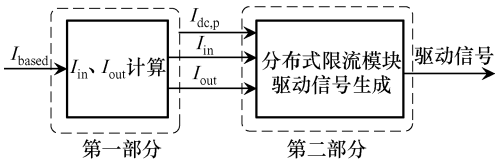


图 6 所提故障穿越策略的控制方法

Fig. 6 Control method of the proposed fault ride-through strategy

第二部分中分布式限流模块驱动信号的生成原理如图 7 所示，图中 S_{DCLM} 表示分布式限流模块中 IGBT 的驱动信号。由图 7 可见，当 $I_{dc,p}$ 增大超出 I_{in} 时，S_{DCLM} 将由高变低，IGBT 由导通状态变为切除状态，限流电阻将接入线路，抑制直流母线电流的增大；当 $I_{dc,p}$ 减小到低于 I_{out} 时，S_{DCLM} 将由低变高，IGBT 重新被导通，限流电阻将被旁路。

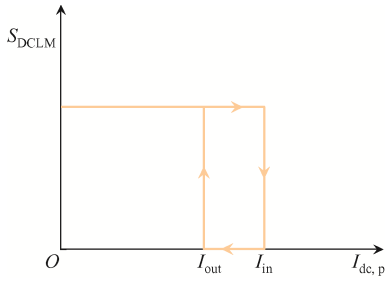


图 7 分布式限流模块驱动信号的生成示意

Fig. 7 Schematic of drive signal generation for DCLM

3.3 故障穿越策略的参数设置原则

所提故障穿越策略涉及的关键参数包括：限流模块投入阈值、限流模块切除阈值、限流模块总阻值和限流模块数量，为保证所提故障穿越策略的有效性，对涉及的关键参数进行逐一分析，明确其设置原则。

首先对限流模块投入阈值和限流模块切除阈

值的设置进行分析，运用参数扫描法，在第 2.1 节所述故障情形下进行仿真，同时为简化分析，将投切滞环值设置为固定值 600 A，并将分布式限流模块简化为如图 8 所示的集中式限流模块，当分布式限流电阻的总阻值与集中式限流模块总阻值相同时，二者的限流效果可完全等效，限流电阻设置为 10 Ω。

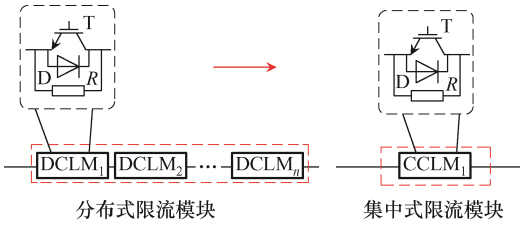


图 8　分布式限流模块等效简化示意

Fig. 8 Equivalent simplified schematic of DCLMs

令限流模块投入阈值在 1 200~3 200 A 的范围内变化，记录对应的故障期间直流母线电流峰值和并联侧 MMC 桥臂电流峰值，结果如图 9 所示。

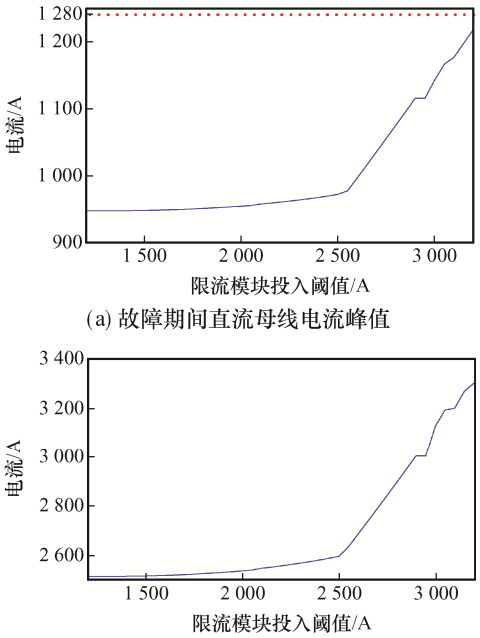


图 9　限流模块投入阈值对故障穿越策略的影响

Fig. 9 Influence of DCLM switch-in thresholds on fault ride-through performance

由图 9 可见，当限流模块投入阈值在 1 200~3 200 A 的宽范围内变化时，直流母线电流峰值和并联侧MMC桥臂电流峰值均与限流模块投入阈值的变化呈正相关。具体而言，当限流模块电流在 1 200~2 500 A 内变化时，直流母线电流峰值和并联侧 MMC 桥臂电流峰值的变化并不显著，直流母线电流峰值的最大值与最小值仅相差 80 A，占最大值的 3.1%；并联侧 MMC 桥臂电流最大值与最小值的变化仅为 25 A，占最大值的 2.6%。当限流模块电流在 2 500~3 200 A 内变化时，直流母线电流峰值和并联侧 MMC 桥臂电流峰值均出现显著增大，说明故障穿越效果显著下降。

从上述分析可以看出，为保证较好的故障穿越效果，设置限流模块的投入阈值在 1 200~2 500 A 即可，在此区间内设置时并无严格限制。本文将限流模块投入值和切除值分别设置为 2 500 和 1 900 A。

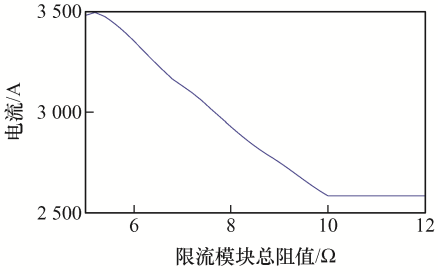
接下来对限流模块总阻值的设置进行分析，同样运用参数扫描法，在第 2.1 节中的故障情形下进行仿真，由于分布式限流模块的数量尚未确定，因此将分布式限流模块依照图 8 等效为集中式限流模块，并将限流模块投入阈值和限流模块切除阈值分别设置为 2 500 和 1 900 A。令限流模块总阻值在 5~12 Ω 的范围内变化，记录对应故障期间直流母线电流峰值和并联侧 MMC 桥臂电流峰值，结果如图 10 所示。

当限流模块总阻值在 5~10 Ω 间变化时，故障期间直流母线电流峰值和并联侧桥臂电流峰值均有显著变化，且与限流模块总阻值的变化呈负相关；当限流模块总阻值在 10~12 Ω 间变化时，由于对应直流母线电流峰值已接近 2 500 A，即设置的限流模块投入阈值，因此故障期间直流母线电流峰值和并联侧桥臂电流峰值基本未变化。

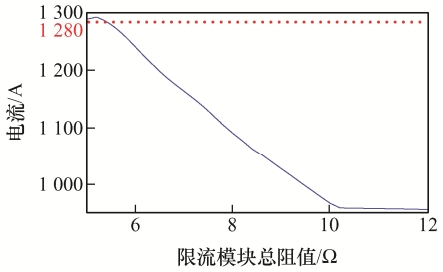
从上述分析可以看出，当限流模块总阻值设置在一定区间内时，设置越大的限流模块总阻值对应的故障期间直流母线电流峰值和并联侧桥臂电流峰值越小，即故障穿越效果越好。因此，仅从故障穿越效果的角度分析，限流模块总阻值越大越好，但实际上，限流模块总阻值的增大也会导致 DCLM 数量的增加，进而导致所需成本增加，二者关系的具体分析如下。

当限流模块总阻值R_{sum}确定后，由图9(a)可得，对应故障期间直流母线电流峰值 $I_{\text{dc,max}}$，令分布式限流模块的数量为 N_{DCLM}，则单个分布式限流的电阻 R_{DCLM} 可表示为

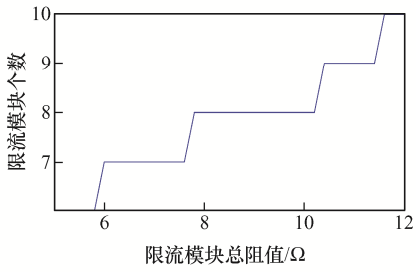
$$R_{\text{DCLM}}=\frac{R_{\text{sum}}}{N_{\text{DCLM}}} \tag{3}$$



(a) 故障期间直流母线电流峰值



(b) 故障期间并联侧MMC桥臂电流峰值



(c) 限流模块总阻值与限流模块数量的关系

图 10 限流模块总阻值对故障穿越策略的影响

Fig. 10 Effect of total DCLM resistance on fault ride-through performance

则故障期间单个分布式限流电阻两端承受的最大电压 $U_{\text{stand,max}}$ 为

$$U_{\text{stand,max}}=R_{\text{DCLM}}I_{\text{dc,max}} \tag{4}$$

为保证故障期间分布式限流模块的IGBT不被击穿，$U_{\text{stand,max}}$ 应满足

$$U_{\text{stand,max}}<U_{\text{tube,max}} \tag{5}$$

式中，$U_{\text{tube,max}}$ 为IGBT能够承受的最大电压，本文考虑工程中最常用的 IGBT 型号[1]，设置其为3 300 V。

联立式(3)~式(5)，可以得出 N_{DCLM} 应满足

$$N_{\text{DCLM}}>\frac{R_{\text{sum}}I_{\text{dc,max}}}{U_{\text{tube,max}}} \tag{6}$$

考虑到 N_{DCLM} 仅能为整数，则 N_{DCLM} 可进一步表示为

$$N_{\text{DCLM}}=\left\lfloor\frac{R_{\text{sum}}I_{\text{dc,max}}}{U_{\text{tube,max}}}\right\rfloor+1 \tag{7}$$

结合图 10(a)与式(5)，可绘制 N_{DCLM} 与 R_{sum} 间的关系，结果如图 10(c)所示。从图中可以看出，随着限流模块总阻值的增大，所需限流模块数量呈阶梯式增大，而随着限流模块数量的增加，所需器件数量增加，会导致所提故障穿越策略所需成本增大。因此，限流模块总阻值的设置原则可总结为：在满足故障期间并联侧MMC不闭锁的故障穿越目标前提下，限流模块总阻值不宜过大。本文将限流模块总阻值设定为 8 Ω，数量为 8。

4 所提故障穿越策略的可靠性分析

考虑所提故障穿越策略在实际应用中可能遇到的问题和挑战，重点对模块可靠性及维护成本问题进行讨论。从 DCLM 各组件(IGBT、二极管和限流电阻)的电压应力情况和电流应力情况 2 个方面进行分析。

在电压应力方面，无故障发生时，DCLM 中的 IGBT 或二极管接入直流母线，起到通流的作用，此时 3 个元件两端的电压应力仅为 IGBT 或二极管的通态压降；有故障发生时，DCLM 中的限流电阻接入直流母线，起到限流的作用，此时 3 个元件两端的电压应力较大，为限流电阻两端的电压。在第 3.3 节参数设置原则中已对此进行了讨论，通过合理的设计，能够避免 IGBT 和二极管过电压，因此在电压应力方面，通过合适的参数设置与器件选型，在实际应用中能够保证模块有较高的可靠性[1]。

在电流应力方面，无故障发生时，DCLM 中的 IGBT 或二极管接入直流母线，起到通流的作用，此时仅有 IGBT 或二极管上存在电流应力，直流母

线电流较小，与流过 MMC 桥臂子模块各器件的电流相差不大，因此 IGBT 或二极管上电流应力较小；有故障发生时，DCLM 中的限流电阻接入直流母线，起到限流的作用，仅有电阻两端承受短时的大电流，IGBT 和二极管均处于关断状态。因此，在电流应力方面，通过合理的可靠性设计与器件选型，在实际应用中能够保证模块有较高的可靠性[20]。

综上所述，在实际应用时，借鉴换流阀子模块的可靠性设计经验以及第 3.3 节中的参数设置原则能够保证 DCLM 具备较高的可靠性。同时在维护检修方面同样可借鉴换流阀子模块的相关经验，考虑与 MMC 换流阀子模块一起进行周期性的维护[1]。

5　仿真验证

5.1　所提故障穿越策略的仿真验证

为了验证本文提出的基于分布式限流模块的 MMC-UPFC 故障穿越策略的有效性和相关参数设置的合理性，在第 2 节中搭建的仿真模型中进行验证，按照第 3 节的方法对所提故障穿越策略的相关参数进行设置，分布式限流模块数量为 8，单个限流模块电阻为 1 Ω，限流模块投入阈值和切除阈值分别为 2 500 和 1 900 A。

图 11(a)为有无故障穿越情形下直流母线电流波形的对比，从图中可以看出，在合理参数设置下，所提故障穿越策略能有效抑制直流母线电流，对比无故障穿越情形，故障期间直流母线电流峰值从 3 514 A 降至 2 936 A，抑制效果显著。图 11(b)为有无故障穿越情形下的并联侧 MMC 桥臂电流绝对值的最大值波形对比，从图中可以看出，在引入所提故障穿越策略后，故障期间并联侧 MMC 桥臂电流绝对值的最大值为 1 090 A，低于设置的过流保护值 1 280 A，说明所提故障穿越策略能实现并联侧 MMC 不闭锁的控制目标。图 11(c)为故障穿越期间限流电阻投入数量，从图中可以看出，在故障期间，分布式限流模块能够按照预设投入，抑制直流母线电流增大，在 TBS 导通后，当直流母线电流低于切除值时切除。

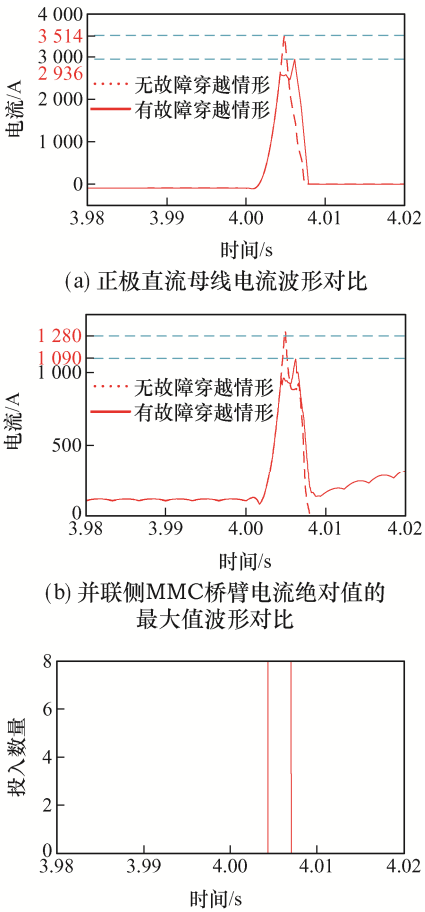


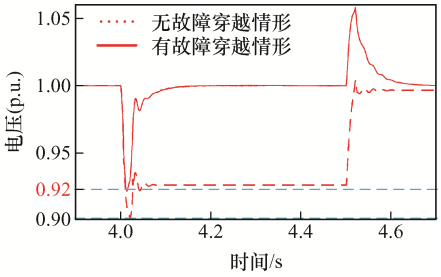
图 11　有无故障穿越情形下关键波形对比

Fig. 11 Comparison of key waveforms with and without fault ride-through

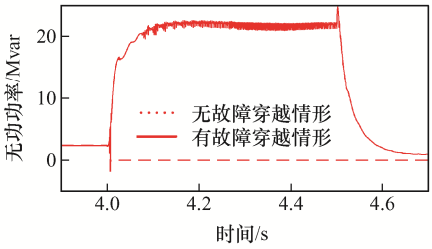
图12(a)和(b)分别为有、无故障穿越情形下的并网点电压和并联侧 MMC 输出无功功率波形对比。从图中可以看出，在应用所提故障穿越策略后，不闭锁的并联侧 MMC 能够发出无功功率，一定程度上保证接入点电压的稳定，与无故障穿越情形对比，并网点电压最深跌落值从 0.90 p.u.增大至 0.92 p.u.。

5.2　不同故障穿越策略的对比

与文献[18]和文献[19]中现有的 MMC-UPFC 故障穿越策略相比，本文提出的故障穿越策略通过在直流母线上串联 DCLM，并按照第 3.3 节中给定的原则设置相关参数，能够具备更强的故障穿越能力。同时，通过对 DCLM 进行主动控制，在正常运行时，未改变主电路的拓扑结构，从而避免了对



(a) 并联侧MMC 的并网点电压对比



(b) 并联侧MMC发出的无功功率对比

图 12 有无故障穿越情形下并网点电压及无功功率对比

Fig. 12 Comparison of voltage at grid-connected points and reactive power with and without fault ride-through

系统动态响应速度的影响。为比较上述 3 种故障穿越策略在动态响应时间和故障穿越能力这 2 个方面的优劣，设置 4 种仿真场景，进行对比说明：场景 A，不采用任何故障穿越策略；场景 B，采用文献[18]中提出的故障穿越策略；场景 C，采用文献[19]中提出的故障穿越策略；场景 D，采用本文提出的故障穿越策略。

首先就动态响应时间进行研究，设置线路无功潮流在 3 s 时从 45 Mvar 阶跃至 60 Mvar，4 种场景下的线路无功潮流波形如图 13 所示。从图中可以看出，场景 A、场景 C、场景 D 下的潮流调节时间基本一致，为 39 ms，而场景 B 的潮流调节时间为

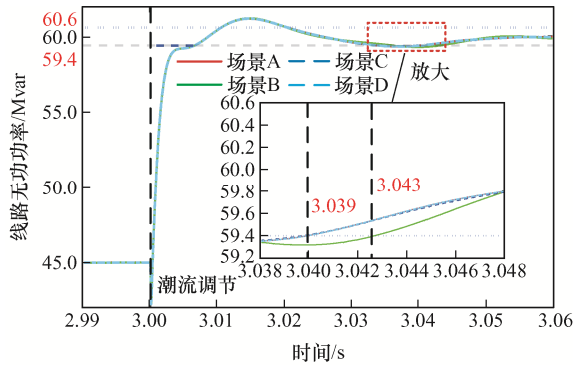


图 13 系统潮流调节对比

Fig. 13 Comparison of system power flow regulation

43 ms。说明文献[18]提出的故障穿越策略确实会对系统的潮流调节速度产生影响，而本文提出的故障穿越策略则不会影响潮流调节速度。

其次对故障穿越能力进行研究，由于场景 A 和场景 C 下故障穿越能力较弱，为更好地体现对比效果，将并联侧 MMC 的过流保护冻结，通过故障期间并联侧 MMC 的桥臂电流峰值反映各场景下的故障穿越能力，场景 B 和场景 C 中相应故障穿越策略的关键参数已按照相关文献中的描述设置为合适值。4 种场景下故障期间并联侧 MMC 桥臂电流绝对值的最大值波形如图 14 所示。从图中可以看出，场景 C 的故障穿越效果较弱，仅能够将桥臂电流峰值从 2 022 A 降至 1 887 A，依然超出了设定的过流保护值。场景 B 和场景 D 下，并联侧 MMC 的桥臂电流峰值显著减小，均低于设定的过流保护值，能够实现故障穿越，且具备较强的故障穿越能力。

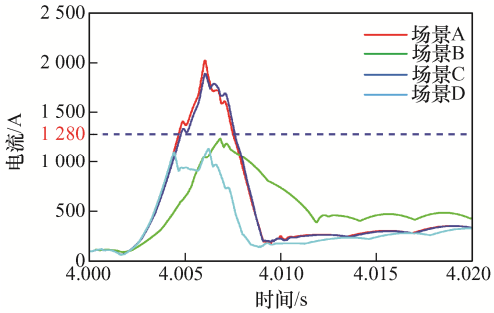


图 14 故障穿越对比

Fig. 14 Comparison of fault ride-through performance

6 结论

本文针对 MMC-UPFC 所在交流母线发生短路故障时，并联侧 MMC 过流闭锁，无法发出无功功率，维持并网点电压的问题，提出了一种基于分布式限流模块的 MMC-UPFC 故障穿越策略，得出如下结论。

(1)在正极直流母线上串入所提的分布式限流模块，当无故障发生时，可通过 DCLM 中的 IGBT 和二极管实现双向通流，与未加入 DCLM 前的主电路拓扑一致，不会影响系统的潮流调节时间；当有故障发生时，可通过关断 DCLM 中的 IGBT，将 DCLM 中的限流电阻接入直流母线，抑制通过直流

母线馈入并联侧 MMC 的故障电流，进而保证并联侧 MMC 不过流闭锁，有效实现故障穿越。

(2)给出了详细合理的参数设置方法，结合仿真效果可以看出，依照分析所得的参数原则对相关参数进行设置，能够保证 MMC-UPFC 在交流电网故障时进行有效的故障穿越，同时避免不必要成本的增加。

(3)与现有故障穿越策略相比，所提故障穿越策略通过引入分布式限流模块，依照合理的参数设置原则，能够保证系统有较强故障穿越能力的同时避免对系统动态响应速度的影响。

参考文献：

[1] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013: 1-25.
Xu Zheng. Flexible DC Transmission System [M]. Beijing: China Machine Press, 2013: 1-25. (in Chinese)

[2] Gomis-Bellmunt O, Sau-Bassols J, Prieto-Araujo E, et al. Flexible converters for meshed HVDC grids: From flexible AC transmission systems (FACTS) to flexible DC grids [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(1): 2-15.

[3] 杨成顺, 张晨曦, 许德智, 等. 基于无冗余子模块 MMC 变换器的固定计算次数模型预测容错控制策略[J]. 电源学报, 2025, 23(8): 82-92.
Yang Chengshun, Zhang Chenxi, Xu Dezhi, et al. Predictive fault-tolerant control strategy based on model with fixed number of calculations for MMC converter without redundant submodules [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(8): 82-92. (in Chinese)

[4] 吴丽丽, 茆美琴, 施永. 含主动限流控制的 MMC-HVDC 电网直流短路故障电流解析计算[J]. 电工技术学报, 2024, 39(3): 785-797.
Wu Lili, Mao Meiqin, Shi Yong. Analytical calculation of DC short-circuit fault current of modular multi-level converter-HVDC grid with active current limiting control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(3): 785-797. (in Chinese)

[5] 朱琴跃, 于逸尘, 占岩文, 等. 基于短时傅里叶变换和深度网络的模块化多电平换流器子模块 IGBT 开路故障诊断[J]. 电工技术学报, 2024, 39(12): 3840-3854.
Zhu Qinyue, Yu Yichen, Zhan Yanwen, et al. IGBT open-circuit fault diagnosis of modular multilevel converter sub-module based on short-time Fourier transform and deep networks [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(12): 3840-3854. (in Chinese)

[6] 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)

[7] Huang Han, Zhang Li, Oghorada O, et al. Analysis and control of a modular multilevel cascaded converter-based unified power flow controller [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(3): 3202-3213.

[8] Wu Xi, Wang Rui, Wang Yifei, et al. A novel UPFC model and its convexification for security-constrained economic dispatch [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(6): 4202-4213.

[9] Liang Weikun, Lin Shunjiang, Liu Jie, et al. Multi-objective mixed-integer convex programming method for the siting and sizing of UPFCs in a large-scale AC/DC transmission system [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(6): 5671-5686.

[10] 武鸿, 王跃, 刘熠, 等. 基于广义电容电压不平衡度的 MMC 子模块开路故障诊断策略[J]. 电工技术学报, 2023, 38(14): 3909-3922.
Wu Hong, Wang Yue, Liu Yi, et al. Open circuit fault diagnosis strategy of MMC sub-module based on generalized capacitor voltage unbalance [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(14): 3909-3922. (in Chinese)

[11] 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)

[12] 刘津濂, 徐政, 杨健, 等. 关于多特征自变量调节的含 UPFC 电力系统的潮流变化率特性[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(1): 186-191, 210.

Liu Jinlian, Xu Zheng, Yang Jian, et al. Regulation principle of power flow gradient to multiple characteristic independent variables in UPFC embedded power system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(1): 186-191, 210. (in Chinese)

[13] 武鸿, 王跃, 刘熠, 等. 基于全桥型 MMC 的开关序列切换方法及 IGBT 开路故障诊断策略[J]. 高电压技术, 2024, 50(4): 1608-1620.
Wu Hong, Wang Yue, Liu Yi, et al. A switching sequence switching method and IGBT open circuit fault diagnosis strategy for full-bridge MMC [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(4): 1608-1620. (in Chinese)

[14] 郑涛, 吴丹, 陆振纲, 等. MMC-UPFC 不同接地设计的故障特性及对本体保护配置影响[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(5): 54-60, 67.
Zheng Tao, Wu Dan, Lu Zhengang, et al. Impact of MMC-UPFC grounding design on fault characteristics and protection scheme [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(5): 54-60, 67. (in Chinese)

[15] 陈勇, 曹伟炜, 柏彬, 等. MMC-UPFC 单相接地故障下运行特性分析及整体保护策略设计[J]. 电工技术学报, 2019, 34(3): 599-610.
Chen Yong, Cao Weiwei, Bai Bin, et al. Operation characteristics analysis under single-phase grounding fault and overall protection scheme design of MMC-UPFC device [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(3): 599-610. (in Chinese)

[16] 梅军, 何梦雪, 王创, 等. 基于分裂电感的限流式 MMC-UPFC[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(10): 116-122.
Mei Jun, He Mengxue, Wang Chuang, et al. Current-limiting MMC-UPFC based on split inductor [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(10): 116-122. (in Chinese)

[17] 王钊, 任健, 许远根, 等. 适用于电网短路故障的新型 UPFC 及其限流控制[J]. 电力电子技术, 2022, 56(10): 81-84.
Wang Zhao, Ren Jian, Xu Yuangen, et al. A new UPFC and its current limiting control for power grid short-circuit fault [J]. Power Electronics, 2022, 56(10): 81-84. (in Chinese)

[18] 郑涛, 汤哲, 张滋行, 等. 基于限流电抗器的统一潮流控制器故障渡越策略及其与保护的配合[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(2): 8-13, 20.
Zheng Tao, Tang Zhe, Zhang Zihang, et al. Fault ride through strategy of unified power flow controller based on current limiting reactor and its coordination with protection [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2): 8-13, 20. (in Chinese)

[19] 汤哲. UPFC 故障渡越策略及其与线路保护配合的研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2021.
Tang Zhe. Research on UPFC fault ride-through strategy and its coordination with line protection [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2021. (in Chinese)

[20] 梅念, 王光达, 陈钊, 等. 模块化多电平换流器子模块关键组部件稳态电流应力全解析化计算[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3712-3719.
Mei Nian, Wang Guangda, Chen Zhao, et al. Steady-state current stress fully analytical calculation of components in sub-modules of modular multilevel converter [J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3712-3719. (in Chinese)



刘国峰

作者简介：

刘国峰(1987—)，男，通信作者，硕士，高级工程师。研究方向：统一潮流控制器的控制。E-mail：liuguofeng@js.sgcc.com.cn。

兰岚(1988—)，女，硕士，高级工程师。研究方向：统一潮流控制器的控制。E-mail：lanlan2@js.sgcc.com.cn。

武鸿(1999—)，男，中国电源学会学生会员，博士研究生。研究方向：模块化多电平换流器的可靠性提升技术。E-mail：wuhong30@stu.xjtu.edu.cn。

刘泳(1981—)，男，硕士，高级工程师。研究方向：统一潮流控制器的控制。E-mail：njliuy@js.sgcc.com.cn。

张天艺(1999—)，女，中国电源学会学生会员，博士研究生。研究方向：统一潮流控制器的先进控制技术。E-mail：zty123@stu.xjtu.edu.cn。

王南勤(1983—)，男，硕士，高级工程师。研究方向：统一潮流控制器的控制。E-mail：wangnq@js.sgcc.com.cn。

(责任编辑：耿越)