

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241683

# 基于限流式潮流控制器的柔直配电系统故障穿越与恢复方案

戴志辉, 石浚阳, 史琛, 江莹, 杨怡诗, 李恒泽

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 河北 保定 071003)

**摘要:** 针对复杂柔直配电系统模块化多电平换流器(modular multi-level converter, MMC)易受故障电流冲击导致闭锁及故障清除后非故障线路潮流过载问题, 提出一种基于限流式潮流控制器的复杂柔直配电系统故障穿越与恢复方案。首先, 分析了限流式潮流控制器的拓扑结构及工作原理。然后, 从源侧与网侧协同限流的角度, 提出故障期间 MMC 无闭锁穿越方案, 在保证故障清除选择性的同时为故障识别预留时间裕度。故障清除后通过潮流控制实现功率快速平衡, 满足多支路供电需求。最后, 在 PSCAD/EMTDC 建立复杂环状柔直配电网模型并进行仿真分析, 验证了所提方案具备良好的穿越能力, 且满足实用性与可拓展性。

**关键词:** 无闭锁故障穿越; 限流式潮流控制器; 柔直配电网; 源网协同; 稳态恢复

## A fault ride-through and recovery scheme for flexible DC distribution systems based on current limiting power flow controllers

DAI Zhihui, SHI Junyang, SHI Chen, JIANG Ying, YANG Yishi, LI Hengze

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources

(North China Electric Power University), Baoding 071003, China)

**Abstract:** To address the issues in complex modular multilevel converter (MMC)-based DC distribution systems, specifically, converter blocking caused by fault current surges and post-fault power flow overload in non-faulted lines, this paper proposes a fault ride-through and recovery scheme based on a current limiting power flow controller. First, the topological structure and operational principles of the current limiting power flow controller are analyzed. Second, from the perspective of collaborative current limiting between the source side and the network side, a non-blocking fault ride-through scheme for MMC is proposed. This approach ensures selective fault clearance while providing adequate time margin for fault identification. After fault clearance, the scheme enables rapid power balance via adaptive power flow control, effectively meeting the supply demands of multiple feeders. Finally, a complex ring-type flexible DC distribution network model is established in PSCAD/EMTDC for simulation analysis. The results verify that the proposed scheme offers excellent fault ride-through capability and meets both practicality and scalability requirements.

This work is supported by the Natural Science Foundation of Hebei Province (No. E2024502043).

**Key words:** non-blocking fault ride-through; current limiting power flow controller; flexible DC distribution network; generation-grid coordination; steady-state recovery

## 0 引言

近年来, 随着新能源发电与电力电子技术的不断发展, 配电网面临分布式能源大量接入、电力电子负荷持续增长的发展趋势, 产生配电系统结构复杂、负荷调度困难等问题<sup>[1-2]</sup>。在新型电力系统建设

背景下, 柔直配电网具有电能质量高、控制灵活、更易与可再生能源和储能设备高效集成等优点, 发展前景广阔<sup>[3-5]</sup>。但柔直配电系统惯性低、阻尼小、短路电流发展速度快且无过零点, 故障隔离与清除难度大<sup>[6-7]</sup>。

模块化多电平换流器(modular multi-level converter, MMC)作为柔直配电系统中的核心换流设备, 其故障响应特性直接关系到整个系统的可靠

基金项目: 河北省自然科学基金项目资助(E2024502043)

性与稳定性<sup>[8-9]</sup>。现阶段根据故障时 MMC 工作状态不同, 柔直配电系统故障阻断方法分为 MMC 闭锁故障清除与 MMC 无闭锁故障穿越两类。为实现 MMC 闭锁故障清除, 文献[10-11]分别提出全桥子模块与钳位双子模块, 利用电容反电动势阻断续流通路。文献[12]提出一种具备自均压能力的移位全桥子模块, 通过将电容反向接入回路清除故障电流。文献[13]提出一种五电平新型子模块, 通过闭锁子模块实现直流故障清除。上述子模块拓扑构成的 MMC 仅可进行闭锁型故障穿越, 且结构与控制均较为复杂。闭锁期间系统将失去对 MMC 的控制能力, 若不能及时清除故障, 则易引起全网停运, 影响配电网供电可靠性。此外在结构复杂的多端柔直配电网中, 重启闭锁 MMC 需与各端换流站配合, 故重启过程较为复杂。

为避免 MMC 闭锁造成不利影响, MMC 无闭锁故障穿越方案应运而生。相比于 MMC 闭锁的被动控制, 主动限流与穿越方案更适用于未来大规模直流电网。MMC 无闭锁故障穿越方案主要分为 3 类: 源侧、网侧及源网协同。其中源侧穿越方案通过改造 MMC 拓扑结构及控制系统或采用具备负电平输出能力的子模块限制短路电流, 进而实现 MMC 无闭锁穿越。文献[14]提出一种具备双向输出能力的交叉连接双子模块并验证其可行性。文献[15]提出一种基于零直流电压控制的混合型 MMC 故障穿越策略, 具有故障过程不间断 MMC 功率传输的优势。文献[16]提出一种基于负直流电压控制的无闭锁故障穿越策略, 提升了故障电流清除速度。上述方案通过改造 MMC 实现无闭锁故障穿越, 但不能为柔直配电路提供选择性保护, 且受制于换流阀内功率开关器件耐流水平<sup>[17]</sup>。

相比于源侧穿越方案, 网侧穿越方案通过故障清除设备实现故障线路选择性隔离与能量耗散。该方案对于多端柔直配电系统有较强适用性, 提高故障穿越能力的同时保证非故障线路供电可靠性<sup>[18]</sup>。文献[19-21]提出多种应用于直流系统的限流器, 包括电阻型限流器、混合式限流器及固态限流器, 配合直流断路器(DC circuit breaker, DCCB)可实现故障清除。文献[22]提出一种基于限流器的直流系统故障穿越方法, 利用自身拓扑阻断故障回路, 防止 MMC 闭锁。但限流器需待保护系统识别与定位故障后动作, 延时期间故障电流会对 MMC 内部器件的安全造成严重威胁, 易导致故障穿越失败。此外, 当 DCCB 动作后系统拓扑结构发生变化, 上述方案未考虑非故障线路过载情况。

相较于直流输电系统, 多端柔直配电系统拓扑结构更为复杂, 潮流波动频繁且双向流动, 传统控制改进方案应用受限<sup>[23]</sup>, 故单依靠源侧或网侧方案实现故障穿越难以满足系统选择性与可靠性需求。为此, 提出一种基于限流式直流潮流控制器(direct-current power-flow controller, DCPFC)的柔直配电网故障穿越与恢复方案, 该方案既能抑制故障电流, 实现 MMC 无闭锁穿越, 又能保障足够的故障检测与识别时间, 提升保护可靠性。首先, 提出限流式 DCPFC 结构、工作原理及在不同工况下功能灵活切换方法。基于 DCPFC 结构, 提出面向复杂柔直配电网的源网协同故障穿越方案, 在 MMC 无闭锁的前提下, 为故障识别预留时间裕度, 抑制故障危害向交流侧渗透。其次, 针对 DCCB 动作后非故障线路过载问题, 提出应用限流式 DCPFC 的稳态恢复方案。最后, 基于 PSCAD/EMTDC 平台进行仿真分析, 并与其他典型方案进行对比, 验证所提方案的有效性。

## 1 MMC 拓扑结构与故障特征分析

### 1.1 MMC 拓扑结构

相比于两电平电压源型换流器(voltage source converter, VSC), MMC 具备更好的电能质量, 可控性相对较高, 因此在直流电网领域应用广泛。MMC 具备双向工作能力, 既可整流, 亦可逆变, 本文以 MMC 作整流器为例, 建立三相半桥型 MMC 拓扑结构如图 1 所示。

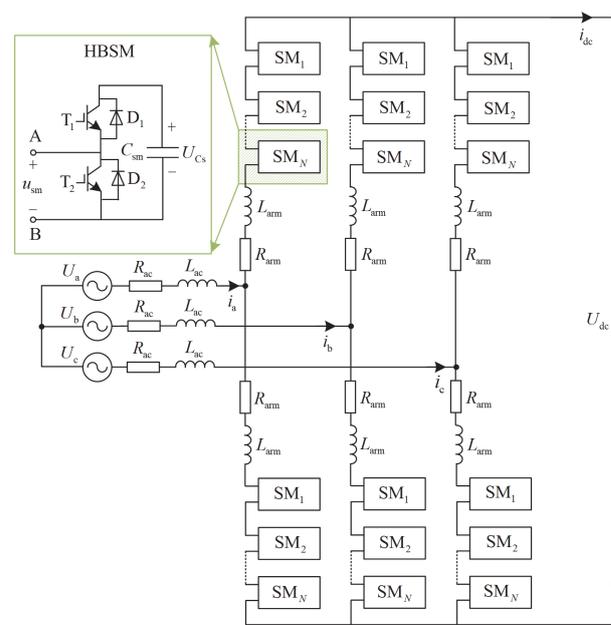


图 1 半桥型 MMC 拓扑结构

Fig. 1 Topology structure of half bridge MMC

以图 1 所示电流方向为参考正方向, MMC 共有 6 个桥臂, 每个桥臂由  $N$  个半桥子模块(half-bridge submodule, HBSM)与桥臂电抗器串联而成, 每一相上下两桥臂构成相单元, 通过改变桥臂子模块投入数量, 即可改变 MMC 工作状态, 实现灵活输配电。其中,  $L_{arm}$  为桥臂电抗器电感,  $R_{arm}$  为桥臂等效电阻。MMC 交流侧通过等效电阻  $R_{ac}$ 、电感  $L_{ac}$  与交流电网相连。HBSM 拓扑结构如图 1 所示, 由 IGBT、二极管及电容器构成, 其中  $u_{sm}$  为子模块连接端口电压。半桥子模块具备 3 种不同的工作状态, 如表 1 所示, 其中  $U_{Cs}$  为子模块电容电压。通过控制子模块中 IGBT 的开关状态, 即可实现子模块投切<sup>[24-26]</sup>。

表 1 半桥子模块工作状态

Table 1 Working status of half-bridge submodule

状态	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	电流方向	$u_{sm}$	说明
闭锁	0	0	1	0	A 到 B	$U_{Cs}$	电容充电
	0	0	0	1	B 到 A	0	旁路
投入	1	0	0	0	A 到 B	$U_{Cs}$	电容充电
	0	0	1	0	B 到 A	$U_{Cs}$	电容放电
切除	0	1	0	0	A 到 B	0	旁路
	0	0	0	1	B 到 A	0	旁路

### 1.2 MMC 直流故障特征

基于 MMC 构建的柔直配电系统中直流短路故障主要包括双极短路与单极接地故障, 其中双极短路故障是直流系统危害最严重的故障类型<sup>[27-28]</sup>, 故考虑故障电流对系统冲击最大的情况, 对双极短路故障特征进行分析。故障电流由 MMC 子模块电容放电与交流系统经换流器馈入直流侧电流两部分构成, 由于交流侧保持三相对称运行状态, 其交流故障分量矢量和为 0。同时交流电源馈流需流经等效电阻  $R_{ac}$ 、电感  $L_{ac}$ , 相较于子模块电容放电响应速度较慢, 因此在故障初始阶段可忽略不计, 分析故障电流时仅考虑子模块放电电流<sup>[29]</sup>。

由于采用子模块均压策略, 故障初始时刻 MMC 子模块正常投切, 任意时刻每相子模块可近似分为两组(每组含有  $N$  个子模块)依次交替放电, 等效电容值为  $C_{sm}/N$ , 如图 2(a)所示。由于投切速度快, 故每相可等效为两组子模块电容以并联形式向故障点放电, 等效电容值为  $2C_{sm}/N$ <sup>[21]</sup>。进一步化简可等效为图 2(c), 其中  $R_{dc}$ 、 $L_{dc}$  分别为直流侧等效电阻与电感。

由图 2 可建立关于子模块电容电压的二阶微分方程, 如式(1)所示。

$$L_{\Sigma}C_1 \frac{d^2 u_c(t)}{dt^2} + R_{\Sigma}C_1 \frac{du_c(t)}{dt} + u_c(t) = 0 \quad (1)$$

式中:  $L_{\Sigma} = L_{dc} + \frac{2}{3}L_{arm}$ ;  $C_1 = \frac{6C_{sm}}{N}$ ;  $R_{\Sigma} = R_{dc} + \frac{2}{3}R_{arm}$ ;  $u_c(t)$  为 MMC 双极短路故障子模块电容电压。

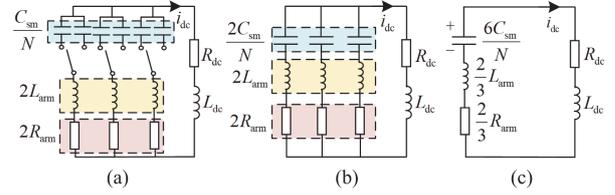


图 2 MMC 双极短路故障等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit of MMC bipolar short circuit fault

假设子模块电容电压初值为  $U_0$ , 故障前直流电流初值为  $I_0$ 。求解式(1)可得  $u_c(t)$  与电容放电电流  $i_{dc}(t)$  的关系如式(2)所示。

$$\begin{cases} u_c(t) = Ae^{-\alpha t} \sin(\omega t + \phi) \\ i_{dc}(t) = A\sqrt{\frac{C_1}{L_{\Sigma}}}e^{-\alpha t} \sin(\omega t + \phi) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $A = \sqrt{U_0^2 + \left(\frac{\alpha U_0}{\omega} - \frac{I_0}{C_1 \omega}\right)^2}$ , 其中  $\alpha = R_{\Sigma}/(2L_{\Sigma})$ ;  $\omega = \sqrt{\frac{1}{L_{\Sigma}C_1} - \frac{R_{\Sigma}^2}{4L_{\Sigma}^2}}$ ;  $\phi = \arcsin\left(\frac{U_0}{A}\right)$ ;  $\phi = \arcsin\left(\frac{I_0}{A\sqrt{C_1/L_{\Sigma}}}\right)$ 。

由上述分析可知, 发生双极短路故障后子模块电容电压迅速下降, 表明子模块电容向故障点放电; 故障电流迅速上升, 当子模块电容电压为零时故障电流达到峰值。

以 a 相桥臂为例, 分析其上、下桥臂流过的故障电流  $i_{up0}$ 、 $i_{down0}$  计算公式分别为

$$\begin{cases} i_{up0} = i_{dc}(t) + \frac{i_s}{2} = A\sqrt{\frac{C_1}{L_{\Sigma}}}e^{-\alpha t} \sin(\omega t + \phi) + \frac{I_m}{2} \sin(\omega_n t + \gamma) \\ i_{down0} = i_{dc}(t) - \frac{i_s}{2} = A\sqrt{\frac{C_1}{L_{\Sigma}}}e^{-\alpha t} \sin(\omega t + \phi) - \frac{I_m}{2} \sin(\omega_n t + \gamma) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $i_s$  为交流相电流;  $\omega_n$  为工频角速度;  $I_m$  为交流电流峰值;  $\gamma$  为交流电流相位。

由式(3)可知, 故障初始阶段桥臂电流与桥臂电感、子模块电容等系统参数相关。由于放电回路阻抗较小, 桥臂电流急剧增大, 系统检测到故障发生

后触发 MMC 闭锁<sup>[25]</sup>。为避免 MMC 闭锁造成不利影响, 故提出 MMC 无闭锁故障穿越与恢复方案。

## 2 限流式 DCPFC 拓扑结构与工作原理

### 2.1 限流式 DCPFC 拓扑结构

所提限流式 DCPFC 包含主支路、H 型桥与工作模块 3 部分。主支路由 IGBT<sub>1</sub> 构成, 为正常负荷电流提供低损耗通流路径。H 型桥由 4 个二极管 (VD<sub>1</sub> - VD<sub>4</sub>) 组成, 具备双向通流能力。限流式 DCPFC 的拓扑结构如图 3 所示, 通过控制电力电子器件通断, 实现潮流控制与限流功能, 其中工作模块以晶闸管为主要器件, 提升 DCPFC 的通流能力、应用范围及经济性。

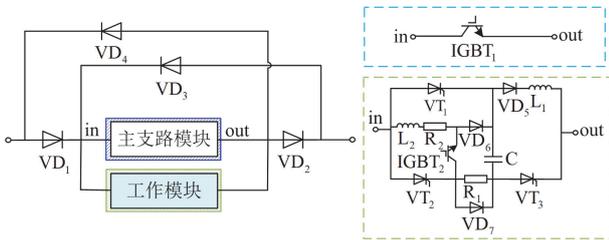


图 3 限流式 DCPFC 拓扑结构

Fig. 3 Topological structure of current limiting DCPFC

### 2.2 DCPFC 工作原理

在多端柔直配电系统中, 若某一线路发生短路故障, 故障电流主要由两部分组成: MMC 子模块电容放电与非故障支路馈流, 其中前者占主导部分。所提 DCPFC 具备限流与潮流控制功能, 故障后分为故障限流与稳态恢复两个阶段, 实现 MMC 故障穿越及故障清除后潮流稳态恢复。

#### 2.2.1 故障限流阶段

多端柔直配电系统故障后电流在短时间内会急剧增大, 故障发展迅速, 若未能及时采取保护措施, 会导致 MMC 受短路电流冲击后闭锁, 易引起全网停运, 影响配电网供电可靠性。为避免影响换流站及非故障线路正常运行, 提出依靠限流式 DCPFC 快速有效阻碍子模块电容放电并限制非故障线路馈入电流的方法, 实现 MMC 故障穿越。

1) 一级限流状态: 当系统正常运行时, 电流流经主支路, 无额外运行损耗。故障后 DCPFC 通过检测各支路电流情况判断是否切换一级限流状态, 该状态通过限制短路电流上升速率, 避免设备受到过电流冲击, 为保护系统提供足够的故障识别时间。控制系统给晶闸管 VT<sub>1</sub>、VT<sub>3</sub> 施加开通信号并关断主支路, 故障电流流经路径 VT<sub>1</sub> → C → VT<sub>3</sub>。电容 C 完全充电后, VT<sub>3</sub> 由于电流低于晶闸管维持电流

而自然关断, 故障电流流路径如图 4 所示, 限流电感 L<sub>1</sub> 被投入故障线路。

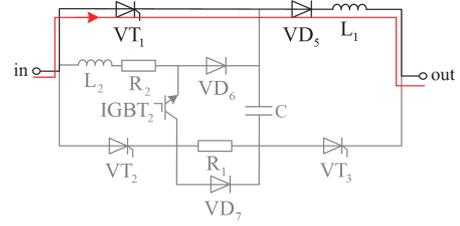


图 4 一级限流状态工作原理

Fig. 4 Working principle of first-level current limiting state

2) 二级限流状态: 针对短路电流较大的故障类型, 为加快故障清除速度、降低 DCCB 故障清除难度, 将故障支路 DCPFC 切换至二级限流状态。故障识别完成后, 控制系统给 VT<sub>2</sub> 施加触发信号, VT<sub>1</sub> 由于承受电容 C 反向电压而关断, 故障电流流经路径 VT<sub>2</sub> → VD<sub>7</sub> → C → VD<sub>5</sub> → L<sub>1</sub>。该阶段电容 C 反向充电, VT<sub>2</sub> 由于电容器钳位作用自然关断。故障电流流路径如图 5 所示, L<sub>2</sub> 与 R<sub>2</sub> 被投入故障回路。

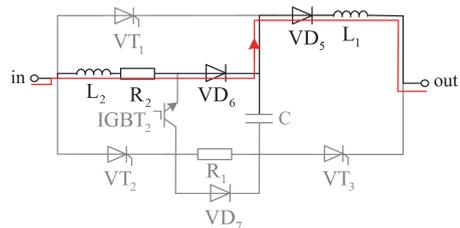


图 5 二级限流状态工作原理

Fig. 5 Working principle of secondary current limiting state

#### 2.2.2 稳态恢复阶段

由于多端柔直配电系统拓扑结构复杂, 系统潮流随故障切除后拓扑结构改变而变化, 故需要综合考虑故障切除后非故障线路过载情况, 设计稳态恢复方案。所提 DCPFC 通过动态投切电容进行能量转移与消耗, 从而实现潮流控制。

1) 限流退出状态: 故障切除后, 控制系统先后给 VT<sub>2</sub> 与 IGBT<sub>2</sub> 施加触发信号, 电流由 L<sub>2</sub> 与 R<sub>2</sub> 支路转移至 VT<sub>2</sub> 支路, 转移路径如图 6 中红线所示。电容 C 经电阻 R<sub>1</sub> 消耗残余电量。若 DCPFC 未切换至二级限流状态, 则可通过导通 VT<sub>2</sub> 利用电容反向电压关断 VT<sub>1</sub> 切换工作状态。

2) 潮流控制状态: 电容残余能量消耗完毕, 控制系统给 IGBT<sub>2</sub> 施加关断信号。电流流经路径如图 7 所示, 电容 C 被重新投入, 线路中潮流能量转移存储至电容 C 中。通过控制占空比实现 IGBT<sub>2</sub> 开通

与关断，动态投切电容以进行能量转移与消耗，从而实现非故障线路电流的稳定与恢复。

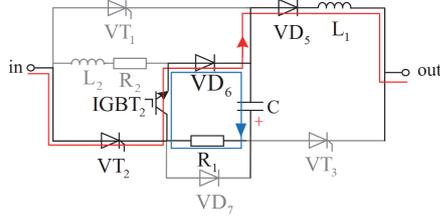


图 6 限流退出状态工作原理

Fig. 6 Working principle of current limiting exit state

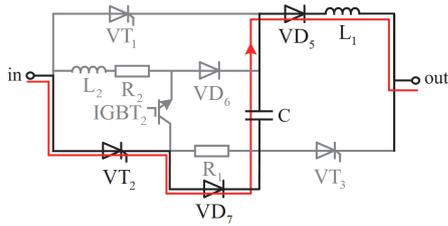


图 7 潮流控制状态工作原理

Fig. 7 Working principle of power flow control state

### 3 基于限流式 DCPFC 的 MMC 故障穿越方案

基于 MMC 的多端柔直系统拓扑结构如图 8 所示，由直流线路、MMC、DCPFC、DCCB 与 MMC 出口辅助耗能模块 E 构成。

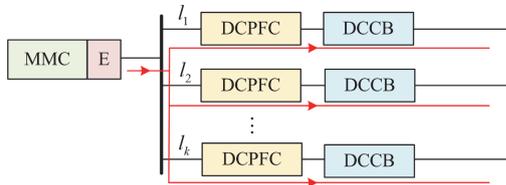


图 8 正常工况阶段电流通路

Fig. 8 Current flow path under normal operating conditions

辅助耗能模块 E 安装位置与拓扑结构如图 9 所示，包含通态低损耗支路与耗能支路。1) 通态低损耗支路由两个反串联的 IGBT 和与之反并联的二极管、超快速机械开关(ultrafast disconnecter, UFD)构成。UFD 的作用为防止通态低损耗支路 IGBT 因暂态过电压冲击被击穿。2) 耗能支路由二极管、耗能电阻  $R_3$  与限流电感  $L_3$  组成，可有效降低 MMC 闭锁前子模块电容放电速率与电流峰值，为 DCCB 投入预留时间裕度。

辅助耗能模块 E 的主要作用为：1) 与 DCPFC 配合实现 MMC 故障穿越，限制桥臂电容放电电流上升速率，消耗桥臂电容能量；2) 故障线路切除后，抑制非故障线路向 MMC 注入残余过电流。

以线路  $l_1$  发生双极短路故障为例，对方案故障

穿越及稳态恢复能力展开分析。

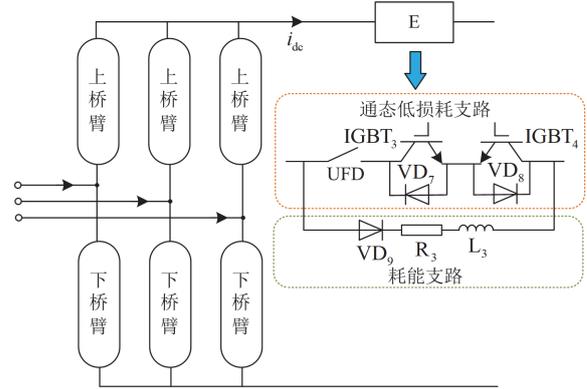


图 9 辅助耗能模块 E 安装位置与拓扑结构

Fig. 9 Installation location and topological structure of auxiliary energy consumption module E

1) 故障穿越阶段：电流流路径如图 10 所示，馈入故障点的电流源于 MMC 子模块电容放电以及远端换流站经非故障线路对故障点放电。针对远端换流站经非故障线路对故障点放电情况，各支路 DCPFC 通过切换一级限流状态限制故障电流上升速率，减小对设备的冲击。保护系统识别出故障线路后由控制系统向该线路 DCPFC 发送动作信号并切换二级限流状态，降低 DCCB 瞬态应力，加快故障清除速度。

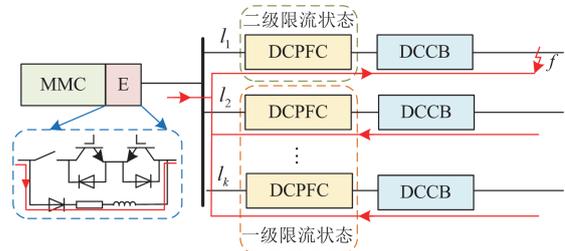


图 10 故障穿越阶段电流通路

Fig. 10 Current flow path during fault ride-through

故障识别期间电流依然迅速上升，对 MMC 内部器件安全造成严重威胁。目前直流故障穿越依赖控制系统快速反应，为及时限制 MMC 侧子模块放电电流，故设置辅助耗能模块 E，保障延时期间电力电子器件安全，DCPFC 切换至二级限流状态，以协助 MMC 实现故障穿越；控制系统检测到故障发生，给 IGBT<sub>3</sub> 施加关断信号并给 UFD 发出分闸指令，将故障电流转移至耗能支路，该支路用于消耗桥臂电容能量并限制 MMC 侧故障电流。

2) 稳态恢复阶段：故障线路由 DCCB 切除后，由于非故障线路 DCPFC 中限流电感的存在使得电流方向不能突变，残余过电流转而流入 MMC。辅助耗能模块 E 从外部可视为单向通流的二极管阀组，

即残余过电流不会对子模块电容充电, 降低 MMC 过电压风险。由于故障切除后拓扑变化, 会引起系统潮流重新分配, 非故障线路存在过载风险, 故在系统稳态恢复阶段非故障线路 DCPFC 需要及时切换至潮流控制状态; 故障线路 DCPFC 通过导通 IGBT<sub>2</sub> 消耗电容残余电量。辅助耗能模块 E 将电流转移至通态低损耗支路。该阶段电流流路径如图 11 所示。

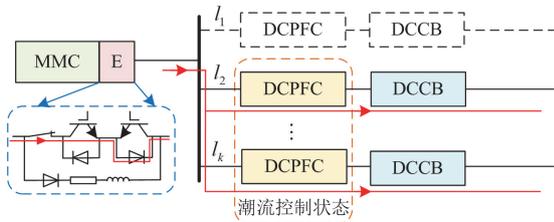


图 11 稳态恢复阶段电流通路图

Fig. 11 Current flow path during stable recovery

故障穿越及稳态恢复阶段限流式 DCPFC 及辅助耗能模块 E 工作时序图如图 12 所示。

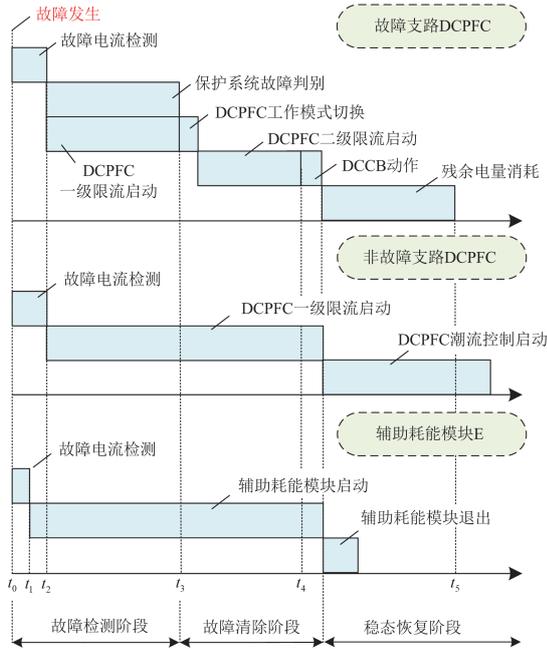


图 12 限流式 DCPFC 及辅助耗能模块工作时序图

Fig. 12 Timing diagram of current limiting DCPFC and auxiliary energy consumption module operation

## 4 判据选择与参数选取

### 4.1 判据选择

根据前文分析可知, 直流线路极间短路后 MMC 子模块电容向故障点放电, 短路故障电流迅速上升。为防止故障电流值超越 IGBT 所能承受的最大峰值电流(即 IGBT 最大通流能力)而损坏, 在 DCCB 动作之前, 桥臂电流瞬时值上限取决于 IGBT

自保护阈值。限流式 DCPFC 与辅助耗能模块 E 需将 MMC 桥臂电流限至 2 倍额定电流之内。MMC 桥臂电流表达式为

$$I_{\text{armN}} = \sqrt{\left(\frac{I_{\text{dcN}}}{3}\right)^2 + \left(\frac{I_{\text{acN}}}{2}\right)^2} \quad (4)$$

式中:  $I_{\text{armN}}$  在工程实际中被定义为桥臂电流有效值;  $I_{\text{dcN}}$  为额定直流电流;  $I_{\text{acN}}$  为额定交流相电流。为确保一定安全裕度, 所选 IGBT 额定电流  $I_{\text{IGBTN}}$  会略大于  $I_{\text{armN}}$ 。  $I_{\text{IGBTN}}$  表达式为

$$I_{\text{IGBTN}} = k_1 I_{\text{armN}} \quad (5)$$

式中:  $k_1$  为比例系数, 其取值大于 1。本节选择 MMC 桥臂电流作为辅助耗能模块 E 启动判据, 如式(6)所示。

$$\max\{i_{\text{armA}}, i_{\text{armB}}, i_{\text{armC}}\} > k_{\text{set}} k_1 I_{\text{armN}} \quad (6)$$

式中:  $i_{\text{armx}}$  表示  $x$  相桥臂电流瞬时值,  $x = a, b, c$ ;  $k_{\text{set}}$  为桥臂电流整定系数。考虑辅助耗能模块 E 动作裕度, 以桥臂故障电流达到 1.5 倍额定值时作为辅助耗能模块 E 启动判据, 故取  $k_{\text{set}}$  为 1.5。

各线路 DCPFC 启动判据如式(7)所示。

$$i_{\text{dcn}} > I_{\text{set}} \quad (7)$$

式中:  $i_{\text{dcn}}$  为第  $n$  条线路故障电流;  $I_{\text{set}}$  为 DCPFC 启动阈值, 设定  $I_{\text{set}} = k_2 I_{\text{N}}$ , 其中  $k_2$  为 DCPFC 启动系数,  $I_{\text{N}}$  为该线路额定电流。判据成立则 DCPFC 进行一级限流。为增强 DCPFC 动作可靠性, 在判据条件引入延时机。通过设定延时参数  $t_{\text{delay}}$ , 确保电流持续低于  $I_{\text{set}}$  一定时间后不再提供控制信号, 避免系统反复启动。

### 4.2 参数选取

#### 4.2.1 电阻电感参数选取

多端柔直配电网双极短路故障等效模型如图 13 所示, 其中电路 I 表示 MMC 等效模型, 电路 II、III 表示经非故障线路连接的远端换流站等效模型, 可拓展至  $k$  条馈流支路。  $L_{\text{dcm}}$ 、  $R_{\text{dcm}}$  分别为第  $m$  条馈流支路的等效电感与等效电阻;  $i_{\text{fm}}$  为第  $m$  条支路馈入故障点电流;  $L_{\text{f}}$ 、  $R_{\text{f}}$  分别表示故障线路电感

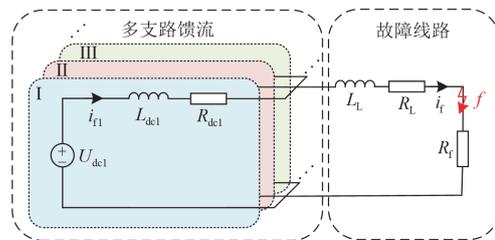


图 13 多端柔直配电网双极短路故障等效电路

Fig. 13 Equivalent circuit of bipolar short circuit fault in multi terminal flexible DC distribution network

和电阻； $R_f$  为故障电阻。

为实现 MMC 无闭锁故障穿越，考虑电路 I 对故障点馈入电流。设 MMC 直流侧电压维持额定值。MMC 至故障点所构回路投入总限流电阻应保证故障电流峰值小于 MMC 出口最大电流，即

$$\frac{U_{dc}}{R_{\Sigma 1} + R_f} \leq k_3 I_{dmax} \quad (8)$$

式中： $R_f$  为 MMC 至故障点所构回路投入总限流电阻， $R_f = R_2 + R_3$ ，其中  $R_2$ 、 $R_3$  分别为故障支路 DCPFC 及辅助耗能模块限流电阻； $R_{\Sigma 1}$  为该故障回路等效电阻， $R_{\Sigma 1} = R_{dc1} + R_L$ ； $k_3$  为比例系数，且  $k_3 < 1$ ； $I_{dmax}$  为保障 MMC 无闭锁允许最大出口电流。根据式(6)及式(9)可得  $R_f$  取值条件为

$$R_f \geq \frac{U_{dc}}{3k_{set} k_1 k_3 I_{ammN}} - R_{\Sigma 1} \quad (9)$$

由式(9)可确认限流电阻取值范围。此外，耗能电阻  $R_1$  用于耗散电容自身残余电量，综合经济性与耗能速度， $R_1$  取值为  $1 \Omega$ 。

考虑直流故障初期桥臂电流上升主要取决于直流电流，根据式(2)及式(6)，故障穿越期间限流电感  $L_f$  可由式(10)得到。

$$\begin{cases} A_f \sqrt{\frac{C_1}{L_{\Sigma 1} + L_f}} e^{-\alpha_f t_a} \sin(\omega_f t_a + \phi_f) \leq 3k_{set} k_1 I_{ammN} \\ L_f = L_1 + L_2 + L_3 \end{cases} \quad (10)$$

式中： $A_f = \sqrt{U_o^2 + \left( \frac{\alpha_f U_o}{\omega_f} - \frac{I_o}{C_1 \omega_f} \right)^2}$ 。其中  $\alpha_f = R_{\Sigma 1} / 2(L_{\Sigma 1} + L_f)$ ； $\omega_f = \sqrt{\frac{1}{(L_{\Sigma 1} + L_f)C_1} - \frac{R_{\Sigma 1}^2}{4(L_{\Sigma 1} + L_f)^2}}$ ； $L_1$ 、 $L_2$  分别为 DCPFC 一级限流及二级限流电感； $L_3$  为辅助耗能模块限流电感； $L_{\Sigma 1}$  为故障回路等效电感； $t_a$  为

DCCB 动作时间； $\phi_f = \arcsin \left( \frac{I_o}{A_f \sqrt{C_1 / (L_{\Sigma 1} + L_f)}} \right)$ 。由

式(10)可对  $L_f$  进行参数选取，实际取值需要根据系统参数计算。考虑在故障初始阶段限制故障电流上升率，避免电力电子器件过电流损坏，故  $L_1$ 、 $L_3$  选值均为  $5 \text{ mH}$ 。

#### 4.2.2 电容参数选取

MMC 故障穿越期间 DCPFC 中电容  $C$  的取值与充电电压峰值及故障电流峰值相关，分析电容取值与其他参数关系如图 14 所示。

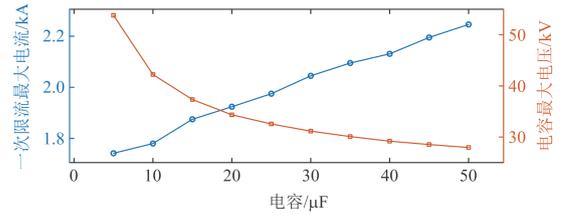


图 14 电容取值对一次限流最大电流、电容最大电压的影响

Fig. 14 Influence of capacitor value on fault current and capacitor voltage

由图 14 可知，电容  $C$  的取值与电容最大电压呈负相关，而与一级限流最大电流呈正相关。为实现快速限流，防止  $VT_1$  关断后未能完全恢复阻断能力从而再次导通，综合考虑限流时间、电压应力以及经济性等多方面因素，电容  $C$  取值  $30 \mu\text{F}$ 。

## 5 仿真分析

为验证所提基于限流式 DCPFC 的柔直配电网故障穿越及恢复方案的有效性，进一步分析 DCPFC 与辅助耗能模块 E 的故障穿越及恢复能力，在 PSCAD/EMTDC 平台搭建如图 15 所示的多端环状柔直配电网拓扑结构。其中，直流电压等级为  $\pm 10 \text{ kV}$ ，交流主网的电压等级为  $110 \text{ kV}$ ，设置故障

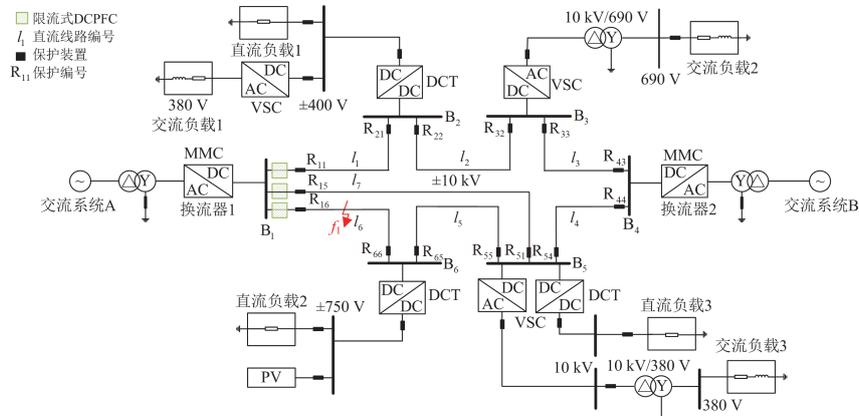


图 15 多端环状柔直配电网的拓扑结构

Fig. 15 Topological structure of multi-terminal ring flexible DC distribution network



时间为 0.5 s。根据仿真模型相关参数及式(3)一式(9), 确定相关参数  $R_1$ 、 $L_1$ 、 $R_2$ 、 $L_2$ 、 $R_3$ 、 $L_3$  和  $C$  分别取值  $1 \Omega$ 、 $5 \text{ mH}$ 、 $10 \Omega$ 、 $20 \text{ mH}$ 、 $5 \Omega$ 、 $5 \text{ mH}$  和  $30 \mu\text{F}$ 。

## 5.1 MMC 故障穿越能力对比验证

### 5.1.1 MMC 桥臂电流

设置线路  $l_6$  出口在 0.5 s 时发生双极短路故障, 截取 0.49~0.52 s 时段内 MMC 的三相桥臂电流变化, 仿真结果如图 16 所示。

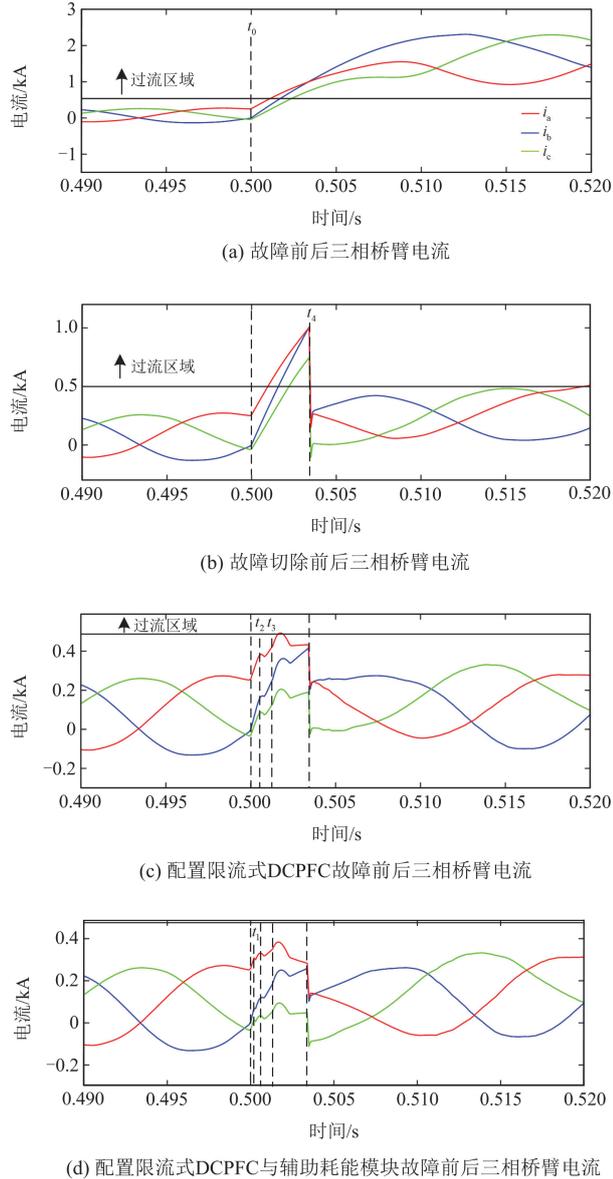


图 16 三相桥臂电流变化

Fig. 16 Changes in three-phase bridge arm current

图 16 箭头指向区域为 2 倍 MMC 额定电流以上的过流区域, 当 MMC 桥臂故障电流上升至过流区域时的 MMC 将触发闭锁。根据图 16(a)可知, 发生

故障后桥臂电流在经短暂延迟后迅速升高, MMC 桥臂电流迅速过流, 最大桥臂电流峰值可达 2.3 kA, 远超两倍额定电流。实际工程中 MMC 阀组将在保护控制作用下闭锁, 功率传输发生中断。由图 16(b)可知, 由于 DCCB 存在控制与动作延时,  $t_4$  时刻 DCCB 切除故障时故障电流已达过流区域, 故系统仅配置 DCCB 切除故障线路不能实现 MMC 故障穿越。配置限流式 DCPFC 故障前后三相桥臂电流如图 16(c)所示, 限流式 DCPFC 分别于  $t_2$ 、 $t_3$  时刻接入限流电感与限流电阻, 各桥臂的电流有一定程度的降低, 限制桥臂电流至过流区域附近。若故障发生于某桥臂电流峰值时刻, MMC 存在闭锁可能性。根据图 16(d)可知, 采用限流式 DCPFC 与辅助耗能模块协同故障穿越方案可将桥臂故障电流限制至过流区域以下且保留一定裕度, 桥臂最大电流值降至 0.38 kA, 有效限制故障电流并保护 MMC 阀组, 实现 MMC 故障穿越。

### 5.1.2 MMC 出口线路

设置与上述相同故障, 截取故障前后 MMC 出口线路电流、有功功率和电压波形分别如图 17、图 18 所示, 验证所提故障穿越方案的有效性。

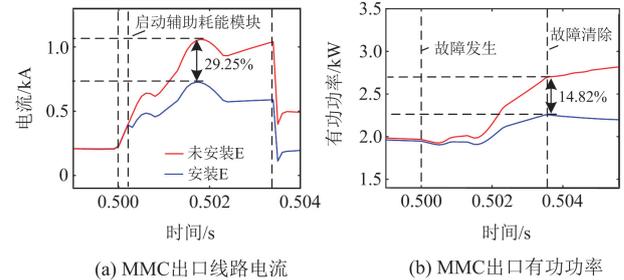


图 17 辅助耗能模块作用效果对比

Fig. 17 Comparison of the effects of auxiliary energy consumption modules

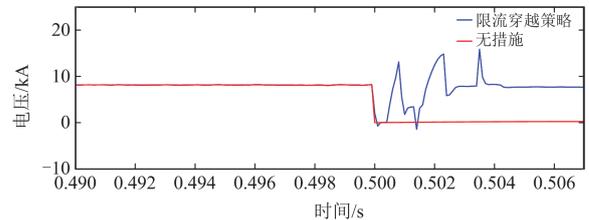


图 18 MMC 出口电压变化

Fig. 18 MMC outlet voltage variation

由于故障电流上升率与故障检测时间矛盾, 不利于 MMC 实现故障穿越。根据图 17 可知, 辅助耗能模块 E 在故障初始阶段投入用于限制 MMC 子模块电容放电电流, 减少 29.25% 的故障电流馈入, 为多端柔直系统保护识别故障线路预留时间裕度, 避

免 MMC 闭锁。在此期间通过消耗直流电网不平衡功率的方式减少 MMC 对于故障点的功率注入，相比于未装备辅助耗能模块该方案减少14.82%的有功功率注入，从而减轻 MMC 直流过电压水平，使柔直配电系统具有良好的故障穿越能力。相比于仅利用网侧方案实现故障穿越，其故障电流清除难度明显降低。

由图 18 可看出，在发生短路故障后，MMC 直流电压瞬间跌至 0，直流功率传输中断。采取所提故障穿越方案后，过电流得到有效抑制，直流电压经短时波动随故障清除逐渐恢复到正常电压，该过程直流电压较平稳，未出现严重过电压，系统可平稳恢复至正常运行状态。

### 5.2 限流与故障恢复能力验证

为验证所提限流式 DCPFC 限流与故障恢复能力，对 MMC 故障穿越阶段出口支路  $i_1$ 、 $i_6$ 、 $i_7$  电流进行仿真分析，仿真结果分别如图 19、图 20 所示。

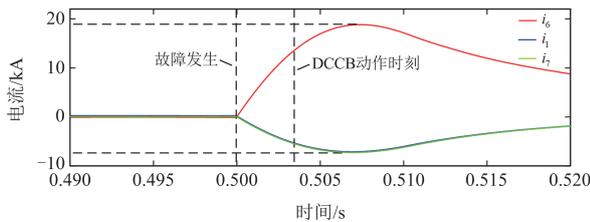
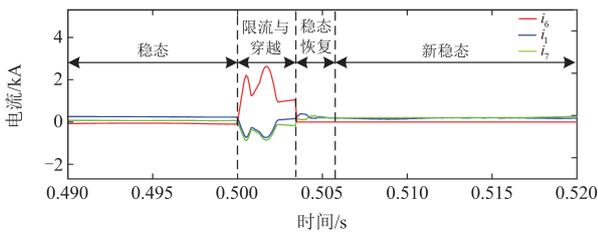
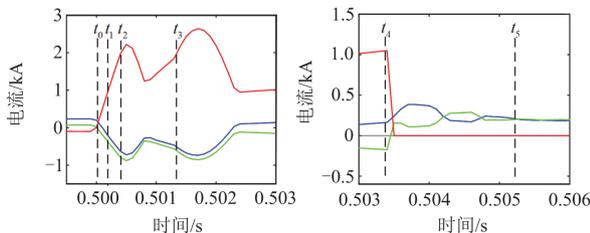


图 19 故障前后 MMC 出口各支路的电流波形  
Fig. 19 Current waveforms of each branch of MMC outlet before and after fault



(a) MMC 出口电流



(b) 限流与穿越阶段

(c) 稳态恢复阶段

图 20 故障穿越与恢复方案下 MMC 出口各支路的电流波形  
Fig. 20 Current waveform of each branch of MMC outlet under fault ride-through and recovery scheme

为分析故障电流变化特征，未设置 MMC 闭锁与 DCCB 动作环节。故障发生双极短路故障后，直流故障电流快速上升，0.01 s 内故障线路电流峰值达 18.6 kA，非故障线路电流峰值达 7.4 kA。由于 DCCB 存在控制与动作延时，理论上切除故障时电流峰值已达 13.2 kA，严重威胁电力电子设备安全运行，甚至导致设备损坏。

图 20 为所提故障穿越与恢复方案下 MMC 出口各支路的电流波形，可划分为 4 阶段：稳态阶段、限流与穿越阶段、稳态恢复阶段、新稳态阶段。 $t_0$  时刻系统发生故障，电流迅速上升。 $t_1$  (0.5002 s) 时刻故障电流上升至辅助耗能模块 E 启动阈值，MMC 输出电流从通态低损耗支路切换至耗能支路，限制子模块电容放电速率。经 2 ms 延时，MMC 出口支路限流式 DCPFC 于  $t_2$  (0.5004 s) 时刻切换支路并投入限流电感进行一级限流，限制各支路故障电流上升速率。在  $t_3$  (0.5013 s) 时刻，保护系统确认故障所在支路，该支路限流式 DCPFC 进行二级限流，非故障支路保持一级限流状态。经通信、器件动作时间等延迟，DCCB 于  $t_4$  (0.5033 s) 时刻进行分断操作。

故障切除后直流配电系统稳态恢复阶段电流波形图如图 20(c) 所示，DCCB 动作后，由于直流电网拓扑结构发生改变，潮流转移易引起非故障线路电流波动甚至越限。为稳定系统潮流，非故障线路 DCPFC 在 DCCB 动作时刻切换工作模式对系统进行潮流控制，非故障线路电流经短时波动于  $t_5$  (0.5053 s) 时刻控制为 0.2 kA 并建立新稳态。

### 5.3 限流式 DCPFC 仿真波形

为分析故障穿越及稳态恢复阶段不同支路限流式 DCPFC 的工作状态，对 DCPFC 模块电容电压和各支路电流进行仿真验证，仿真结果分别如图 21 和图 22 所示。

由图 21 可知，在限流与穿越阶段，控制系统检测到支路电流达到设定值  $I_{set}$  后 DCPFC 切换至一级限流状态，DCPFC 电容进行反向充电。系统识别故障所在支路后，故障支路 DCPFC 切换至二级限流状态，对电容进行正向充电；非故障支路保持一级

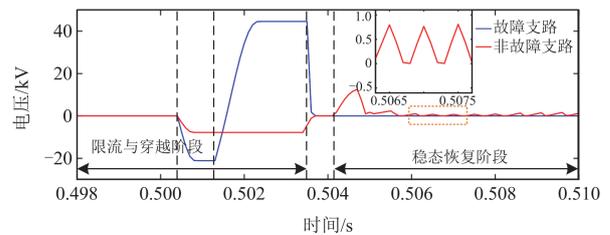


图 21 限流式 DCPFC 电容电压变化

Fig. 21 Capacitor voltage variation of current limiting DCPFC

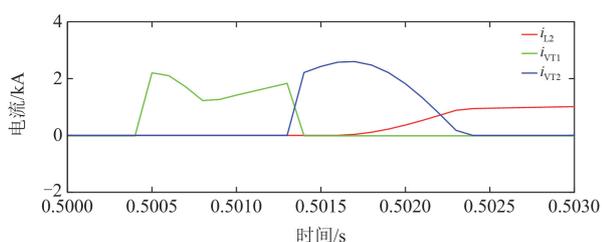


图 22 限流式 DCPFC 各支路电流变化

Fig. 22 Current variation of each branch of current limiting DCPFC

限流状态。故障清除后, 故障支路 DCPFC 开通 IGBT<sub>2</sub> 消耗电容所余电量; 非故障支路 DCPFC 经短时延后, 进入稳态恢复阶段, 通过控制 IGBT 的开通与关断, 动态投切电容以进行能量转移与消耗, 从而实现潮流控制, 稳定非故障支路潮流。

图 22 中  $i_{L_2}$ 、 $i_{VT_1}$  及  $i_{VT_2}$  分别为  $L_2$ 、 $VT_1$  及  $VT_2$  所在支路电流。控制系统检测到故障发生后, 迅速导通  $VT_1$ 、 $VT_3$ ,  $i_{VT_1}$  瞬时增大。经保护识别延时, 故障支路 DCPFC 启动二级限流,  $VT_2$  立即导通, 电流  $i_{VT_2}$  由 0 开始迅速增大至  $i_{VT_1}$ 。电流  $i_{VT_1}$  在电容反向电压作用下迅速跌落至 0,  $VT_1$  关断。此后电容进行正向充电, 故障电流在电容正向电压钳位作用下转移至  $L_2$  所在支路, 随后  $VT_2$  关断, 系统进入二级限流状态。

## 6 方案比较

针对目前所提 MMC 故障穿越方案, 以快速性、选择性、可拓展性与稳态恢复能力为评价原则, 对几种典型技术方案进行比较分析。

1) 快速性: 柔性直流配电系统发生短路故障后系统的响应速度及故障清除速度。

2) 选择性: 复杂柔直配电网发生短路故障后, 故障穿越方案是否具备识别故障后仅切断故障支路并保持电网健全部分正常运行状态的能力。

3) 可拓展性: 随着直流换流站的扩容以及直流网络拓展与复杂化, 现阶段所采用的 MMC 故障穿越方案是否具备应对新增控制保护设备的能力。

4) 稳态恢复能力: 故障清除后, 方案是否具备稳定健全线路潮流及恢复系统正常供电的能力。

表 2 针对所提 MMC 故障穿越方案进行性能比较。子模块及其控制改进方案通过控制 MMC 输出电压以实现故障电流阻断, 但清除速度相较于其他方案普遍较慢<sup>[16]</sup>。本文方案采用源网协同故障穿越方案, 相较于源侧或网侧穿越方案加快了故障清除速度。选择性方面, 子模块及其控制改进方案通常

会影响与故障线路耦合的非故障线路功率传输<sup>[30]</sup>, 而基于 DCCB 的故障穿越方案具备选择故障线路的能力。随着网络的复杂化, 方案选择性较差在一定程度上制约了其可拓展性。

表 2 MMC 故障穿越方案性能比较

Table 2 Performance comparison of MMC fault ride-through solutions

技术方案	快速性	选择性	可拓展性	稳态恢复能力
子模块及其控制改进方案	较慢	较差	较差	较好
限流器与 DCCB 配合方案	较快	好	较好	较差
本文方案	快	好	好	较好

在稳态恢复能力方面, 子模块及其控制改进方案可通过改变控制方式调整 MMC 输送功率, 但难以满足不同支路多负荷供电需求。此外, MMC 控制方式涉及多个控制策略协调优化, 恢复时间较长。限流器与 DCCB 配合方案未考虑由于拓扑变化引起非故障线路的潮流越限问题。本文所提方案通过 DCPFC 快速精准调节潮流, 调整不同支路的功率分配, 避免故障清除后出现某些支路无法满足大负荷需求的情况。综上, 本文方案性能更为均衡, 其故障限流能力及在多端复杂配电网中适应性相对较好。

## 7 结论

为提高多端柔直配电系统故障穿越能力, 提出一种基于限流式 DCPFC 的柔直配电系统故障穿越与恢复方法, 从源网协调配合的角度抑制故障电流, 从而实现 MMC 无闭锁穿越, 适用于网络结构复杂的柔直配电网, 得出以下结论。

1) 所提限流式 DCPFC 具备故障限流与潮流控制两种工作模式, 可在不同工况下实现功能灵活切换, 满足 MMC 故障穿越期间限流需求以及稳态恢复阶段潮流控制需求。

2) 所提方案从源网协调配合角度出发, 通过线路侧限流式 DCPFC 与 MMC 侧辅助耗能模块之间的配合实现 MMC 故障穿越及直流故障清除。

3) 与 MMC 闭锁故障清除方案相比, 所提方案故障期间 MMC 不中断功率传输, 保证故障切除后 MMC 可迅速恢复正常运行。

4) 与其他 MMC 无闭锁故障穿越方案相比, 所提方案在快速性、选择性、可拓展性及稳态恢复能力等各方面性能更为均衡, 更适应多端复杂配电网。

## 参考文献

[1] 张智, 徐永海, 张世聪, 等. 直流配电网电能质量指标研

- 究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(3): 172-187.
- ZHANG Zhi, XU Yonghai, ZHANG Shicong, et al. Review of power quality indices of a DC distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(3): 172-187.
- [2] 刘洪波, 刘坤诚, 盖雪扬, 等. 高比例新能源接入的主动配电网规划综述[J]. 发电技术, 2024, 45(1): 151-161.
- LIU Hongbo, LIU Shencheng, GAI Xueyang, et al. Overview of active distribution network planning with high proportion of new energy access[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(1): 151-161.
- [3] 戴志辉, 黄敏, 苏怀波. 基于 MMC 的环状直流配电网在不同接地方式下的故障特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 1-10.
- DAI Zhihui, HUANG Min, SU Huaibo. Analysis on fault characteristics of MMC-based ring DC distribution networks under different grounding modes[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 1-10.
- [4] 戴志辉, 李毅然, 焦彦军, 等. 耐受高阻和强噪声的柔直配电网线路保护原理[J]. 高电压技术, 2022, 48(10): 3966-3974.
- DAI Zhihui, LI Yiran, JIAO Yanjun, et al. Protection scheme for flexible DC distribution lines with high resistance and strong noise endurance ability[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 3966-3974.
- [5] 刘书瀚, 庄园, 梁战, 等. 含直流断路器的柔直配电网过电压与绝缘配合[J]. 电力工程技术, 2023, 42(3): 61-71, 80.
- LIU Shuhan, ZHUANG Yuan, LIANG Zhan, et al. Overvoltage and insulation coordination of flexible DC distribution network with DC circuit breaker[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(3): 61-71, 80.
- [6] 何东, 甘贝贝, 袁英硕, 等. 基于暂态电压 Pearson 相关系数的柔性直流配电网纵联保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(20): 166-176.
- HE Dong, GAN Beibei, YUAN Yingshuo, et al. Longitudinal protection method of flexible DC distribution network based on transient voltage Pearson correlation coefficient[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(20): 166-176.
- [7] 韦延方, 杨萍, 杨湛晔, 等. 基于 EWT 改进限流电抗电压的柔性直流配电网故障保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(23): 22-32.
- WEI Yanfang, YANG Ping, YANG Zhanye, et al. An improved fault protection method for a flexible DC distribution network based on EWT current limiting reactance voltage[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(23): 22-32.
- [8] 李再男, 贾科, 刘子奕, 等. 半桥型 MMC 直流侧故障恢复过程过流机理及抑制方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(23): 180-188.
- LI Zainan, JIA Ke, LIU Ziyi, et al. Overcurrent mechanism and suppression method for dc-side fault recovery process of half-bridge modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(23): 180-188.
- [9] 朱博, 徐攀腾, 王晓雪, 等. 基于混合型 MMC 的柔性直流电网故障电流阻断控制策略[J]. 高压电器, 2024, 60(6): 148-155, 165.
- ZHU Bo, XU Panteng, WANG Xiaoxue, et al. Fault current blocking control strategy for dc grid based on hybrid MMC[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(6): 148-155, 165.
- [10] MARQUARDT R. Modular multilevel converter: an universal concept for HVDC-networks and extended DC-bus-applications[C]// IEEE International Power Electronics Conference(IPEC), June 21-24, 2010, Sapporo, Japan: 502-507.
- [11] MARQUARDT R. Modular multilevel converter topologies with dc-short circuit current limitation[C]// 2011 IEEE 8th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE&ECCE), May 22-26, 2011, Jeju, Korea: 1425-1431.
- [12] 王琛, 谭开东, 王毅, 等. 具备直流故障清除和自均压能力的 MMC 移位全桥子模块拓扑[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(24): 151-160.
- WANG Chen, TAN Kaidong, WANG Yi, et al. Topology of MMC oblique-connection full-bridge sub-module with capability of DC fault clearing and voltage self-balancing[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(24): 151-160.
- [13] 束洪春, 王文韬, 江耀曦, 等. 一种具备直流故障清除能力的新型 MMC 子模块拓扑[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(5): 75-81.
- SHU Hongchun, WANG Wentao, JIANG Yaoxi, et al. Novel MMC sub-module topology with DC fault clearing capability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(5): 75-81.
- [14] ZENG R, XU L, YAO L, et al. Precharging and DC fault ride-through of hybrid MMC-based HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3): 1298-1306.
- [15] 尹太元, 王跃, 段国朝, 等. 基于零直流电压控制的混合型 MMC-HVDC 直流短路故障穿越策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(增刊 1): 343-351.
- YIN Taiyuan, WANG Yue, DUAN Guozhao, et al. Zero DC voltage control based DC fault ride-through strategy for hybrid modular multilevel converter in HVDC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S1): 343-351.

- [16] 魏子文, 王琛, 王毅, 等. 基于负直流电压控制的 MMC 快速无闭锁故障穿越策略[J]. 高电压技术, 2023, 49(4): 1611-1621.  
WEI Ziwen, WANG Chen, WANG Yi, et al. A fast non-blocking fault ride-through strategy for MMC based on negative DC voltage control[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(4): 1611-1621.
- [17] HE D, ZHOU H, LAN Z, et al. Solid-state circuit breaker based on cascaded normally-on SiC JFETs for medium-voltage DC distribution network[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2024, 9(2): 32-46.
- [18] 李帅. 柔性直流电网极间短路故障穿越策略与关键技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.  
LI Shuai. Research on fault ride-through strategy and key technologies of pole-to-pole short circuit in flexible DC grid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [19] 李斌, 何佳伟. 柔性直流配电系统故障分析及限流方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(12): 3026-3036.  
LI Bin, HE Jiawei. DC fault analysis and current limiting technique for VSC-based DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12): 3026-3036.
- [20] XU J, ZHAO X, HAN N, et al. A thyristor-based DC fault current limiter with inductor inserting-bypassing capability[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 7(3): 1748-1757.
- [21] 官二勇, 董新洲, 冯腾. 一种固态直流限流器拓扑结构[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(4): 978-986.  
GUAN Eryong, DONG Xinzhou, FENG Teng. A solid DC current limiter topology[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(4): 978-986.
- [22] 王相飞, 江琴, 赵静波, 等. 一种基于故障限流器的混合级联直流输电系统故障穿越方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(3): 60-67.  
WANG Xiangfei, JIANG Qin, ZHAO Jingbo, et al. Fault ride-through method of hybrid cascaded HVDC transmission system based on fault current limiter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(3): 60-67.
- [23] 张曼. 基于 MMC 的中压直流配电网协调控制和故障穿越策略研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.  
ZHANG Man. Coordinated control strategy and fault ride through strategy of medium voltage DC distribution network based on MMC[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022.
- [24] 郭国胜, 戴鹏, 公铮. 基于模块统一脉宽调制的模块化多电平变换器优化模型预测控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(5): 1478-1489.  
GUO Guosheng, DAI Peng, GONG Zheng. Submodule unified pulse width modulated based optimized model predictive control for modular multilevel converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5): 1478-1489.
- [25] 马焕, 姚为正, 吴金龙, 等. 含桥臂阻尼的 MMC-HVDC 直流双极短路故障机理分析[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2099-2106.  
MA Huan, YAO Weizheng, WU Jinlong, et al. Analysis of DC pole-to-pole short circuit fault behavior in MMC-HVDC transmission systems with bridge arm damper[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2099-2106.
- [26] 刘宇昂, 戴志辉, 杨明玉, 等. 柔性直流电网故障电流复合抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(11): 93-101.  
LIU Yuang, DAI Zhihui, YANG Mingyu, et al. Composite fault-current suppression strategy for flexible DC grids[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(11): 93-101.
- [27] 王泽青, 夏成军, 赖胜杰, 等. 混合型 MMC 非闭锁型直流故障穿越的故障等效模型[J]. 电力工程技术, 2023, 42(2): 103-111.  
WANG Zeqing, XIA Chengjun, LAI Shengjie, et al. Fault equivalent model for non-blocking DC fault ride-through of hybrid MMC[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(2): 103-111.
- [28] 张伟, 滕婕, 罗世刚, 等. 具备低电压穿越能力的自均压型混合直流变换器研究[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(2): 240-248.  
ZHANG Wei, TENG Jie, LUO Shigang, et al. An adaptive-voltage-sharing hybrid DC-DC converter with low voltage ride-through capability[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(2): 240-248.
- [29] 王晓雪. 基于混合型 MMC 的直流电网故障穿越协同控制策略[D]. 吉林: 东北电力大学, 2023.  
WANG Xiaoxue. Coordinated control strategy of fault ride-through for DC grid based on hybrid MMC[D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2023.
- [30] 陈磊, 何慧雯, 王磊, 等. 基于半桥型 MMC 的柔性直流电网故障限流方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(21): 175-186.  
CHEN Lei, HE Huiwen, WANG Lei, et al. Review of the fault current limiting approaches for a flexible DC grid based on a half-bridge MMC[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(21): 175-186.

收稿日期: 2024-12-17; 修回日期: 2025-03-18

作者简介:

戴志辉(1980—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: daihuadian@163.com

石浚阳(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: 18526041256@163.com

(编辑 张颖)