

基于混合型 Chopper 电路的 MMC-UPFC 故障渡越方案

郑涛,王赞鹏,李厚源,吕文轩,张成绮,马家璇
(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室,北京 102206)

摘要:当交流系统发生短路时,基于模块化多电平控制器的统一潮流控制器(MMC-UPFC)串、并联侧 MMC 均会受到故障冲击,存在两侧换流器过流闭锁,MMC-UPFC 完全退出运行的风险。对此,以交流系统发生最严重的三相短路故障为例,分析了 MMC-UPFC 串、并联侧 MMC 故障特性;在此基础上,借鉴风电场交流故障渡越的 Chopper 电路,并结合 MMC-UPFC 不同运行方式对故障特性的影响,提出了基于混合型 Chopper 电路的 MMC-UPFC 故障渡越方案。该方案能够在交流系统发生故障后隔离并联侧 MMC 与串联侧 MMC 之间的联系,从而抑制串联侧馈入并联侧 MMC 的故障电流。仿真结果表明在 MMC-UPFC 的不同运行方式下,所提方案均能避免故障后并联侧 MMC 闭锁,MMC-UPFC 将切换至静止同步补偿器(STATCOM)工作模式,为交流系统提供无功功率支撑。

关键词:UPFC;MMC;换流器;交流系统三相短路;故障渡越;混合型 Chopper 电路

中图分类号:TM 77;TM 46

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202012025

0 引言

作为柔性交流输电系统装置的典型代表,统一潮流控制器(UPFC)可以灵活调节线路潮流,实现并补、串补、移相和调压等功能^[1-2];模块化多电平换流器(MMC)可以实现有功、无功独立控制,并且模块化程度高,谐波含量少,适用于高电压大容量输电场合^[3-5]。因此,基于模块化多电平换流器的统一潮流控制器(MMC-UPFC)具有良好的工程应用前景^[6-9]。

目前国内外有关 MMC-UPFC 保护方向的研究多集中在接地方式、站内故障特性及保护配置等方面。文献[7-9]参照基于 MMC 的高压直流输电系统接地方式,提出适用于 MMC-UPFC 联接变压器的接地方式,并分析了不同接地方式下典型站内交流侧故障特性及其对保护配置的影响;文献[9]对此还提出了改进阀侧短引线差动保护和串联变压器差动保护方案。文献[10]针对串联变压器匝间短路时电流差动保护存在灵敏度和可靠性不足的问题,提出了相应的自适应保护方案。

针对外部交流系统故障对 MMC-UPFC 运行的影响,文献[11]分析了单相接地故障下 MMC-UPFC 的故障特性,并提出了整体保护策略,但并未研究交流系统发生严重短路时 MMC-UPFC 故障特性。文献[12]提出了一种基于分裂电感的限流式 MMC-

UPFC 拓扑结构,可以限制交流系统发生短路故障时,MMC-UPFC 晶闸管旁路开关 TBS(Thyristor Bypass Switch)导通后串联变压器阀侧的故障电流,但并未研究 TBS 导通前 MMC-UPFC 串、并联侧换流器的故障特性。

当交流系统发生短路故障时,短路电流通过串联变压器耦合至阀侧,串联侧 MMC 过流闭锁,同时并联侧 MMC 受到故障的影响,也存在过流闭锁的风险。为充分发挥 MMC-UPFC 并联补偿无功功率的作用,提高故障后电力系统的稳定性,对 MMC-UPFC 的故障渡越能力提出了要求。文献[13]给出 MMC-UPFC 故障渡越的定义并提出通过在直流母线上串联限流电抗器实现 MMC-UPFC 故障渡越的方案,但存在限流电抗器减慢 MMC-UPFC 潮流调节速度的问题。

本文在详细分析交流系统发生三相短路以及 MMC-UPFC 串、并联侧 MMC 故障特性的基础上,提出了适用于 MMC-UPFC 的基于混合型 Chopper 电路的故障渡越方案。该方案能够在交流系统故障后将并联侧 MMC 与串联侧 MMC 隔离,并联侧 MMC 在故障期间可以持续运行,MMC-UPFC 切换为静止同步补偿器(STATCOM)工作模式,继续为交流系统提供无功功率支撑。基于 PSCAD / EMTDC 的仿真结果验证了故障渡越方案的有效性。

1 MMC-UPFC 拓扑结构及控制策略

1.1 MMC-UPFC 拓扑结构

MMC-UPFC 拓扑结构如图 1 所示,图中并联侧 MMC 和串联侧 MMC 的上、下桥臂均由 n 个半桥子模块(HBSM)构成。并联侧 MMC 经并联变压器与 M 侧交流系统母线相连,串联侧 MMC 经串联变压器串入交流线路,与 N 侧交流系统母线相连,两侧换流器之

收稿日期:2020-05-21;修回日期:2020-11-02

基金项目:国家重点研发计划智能电网技术与装备重点专项(2016YFB0900600);国家电网公司科技项目(52094017000W) Project supported by the Key Project of Smart Grid Technology and Equipment of National Key Research and Development Plan of China(2016YFB0900600) and the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (52094017000W)

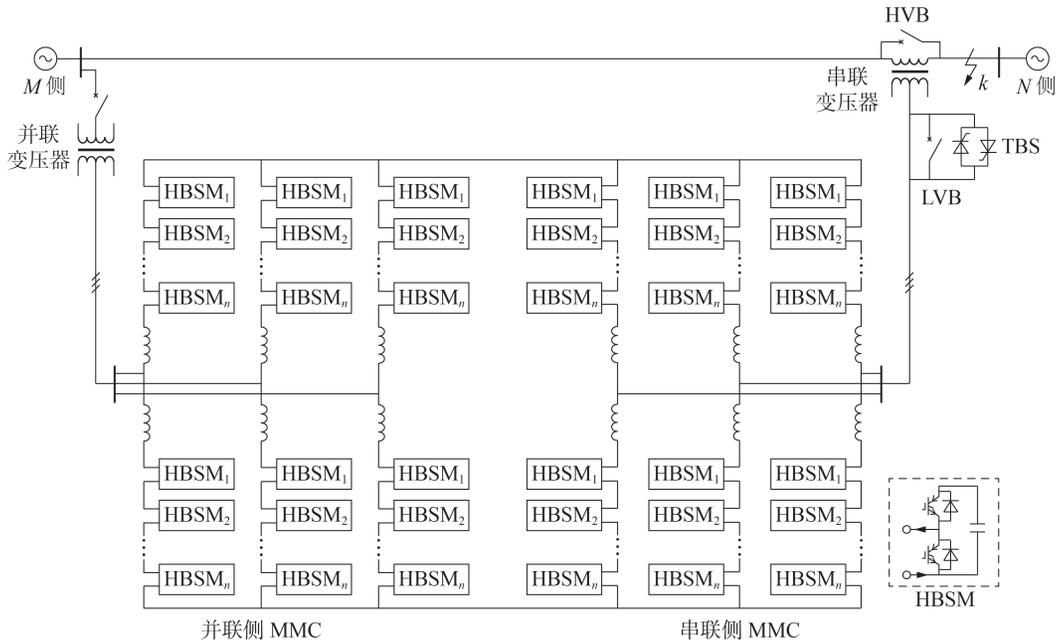


图1 MMC-UPFC拓扑结构

Fig.1 Topology structure of MMC-UPFC

间的直流母线采用背靠背连接方式,可实现有功功率双向流通;串联变压器阀侧绕组配置TBS,根据现有相关文献,当交流系统发生故障时,TBS在串联侧MMC桥臂闭锁后2~3 ms内动作^[12],旁路串联侧MMC,隔离换流阀与交流系统之间的联系。高压侧旁路断路器HVB(High Voltage bypass Breaker)与低压侧旁路断路器LVB(Low Voltage bypass Breaker)在串联侧MMC闭锁后40 ms内合闸,MMC-UPFC退出运行。

1.2 MMC-UPFC控制策略

并联侧MMC为接入母线提供无功支撑,串联侧MMC控制线路潮流,具体的控制框图见附录中图A1。串、并联侧控制器均采用 dq 双环解耦控制;并联侧MMC采用定直流电压和定无功功率控制;串联侧MMC采用定有功功率和定无功功率控制。参照国内某500 kV MMC-UPFC参数,在PSCAD/EMTDC中搭建图1所示的仿真模型。仿真参数见附录中表A1,TBS导通延时为3 ms,HVB和LVB动作延时为40 ms。

2 交流系统短路故障下MMC-UPFC故障特性

2.1 串联侧MMC故障特性

以MMC-UPFC接入的线路发生近端三相短路故障为例,故障后的系统电压几乎全部加在串联变压器网侧,串联侧MMC阀侧电压增大;同时线路三相短路电流经串联变压器耦合至阀侧,串联侧MMC桥臂迅速过流闭锁。

串联侧MMC闭锁后处于不控充电阶段,各相上、下桥臂存在电容充电或短路这2种状态,故障电流通路如图2所示。图中, 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。

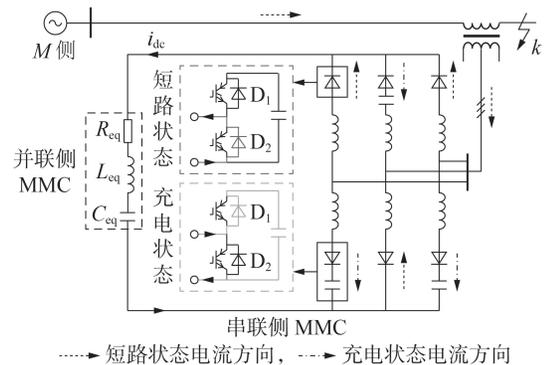


图2 串联侧MMC不控充电阶段故障电流通路

Fig.2 Fault current path of series side MMC during uncontrolled charging stage

处于短路状态的桥臂,阀侧故障电流经过HBSM二极管 D_2 馈入直流母线;处于充电状态的桥臂,阀侧故障电流通过HBSM二极管 D_1 给电容充电。从交流系统故障发生到并联侧MMC闭锁,串联侧MMC馈入直流母线的故障电流 i_{dc} 不断增大,并联侧MMC闭锁后,直流母线故障电流开始衰减;TBS导通后,串联侧MMC桥臂电流快速衰减。

2.2 并联侧MMC故障特性

并联侧MMC采用定直流电压和无功功率外环控制,具体表达式如下^[14]:

$$\begin{cases} i_{sd}^* = K_{U_{dep}}(U_{dref} - U_{dc}) + K_{U_{dci}} \int (U_{dref} - U_{dc}) dt \\ i_{sq}^* = K_{Qp}(Q_{ref} - Q) + K_{Qi} \int (Q_{ref} - Q) dt \end{cases} \quad (1)$$

其中, i_{sd}^* 、 i_{sq}^* 分别为 d 、 q 轴电流参考值; $K_{U_{dep}}$ 和 $K_{U_{dci}}$ 分别为定直流电压控制器比例系数和积分系数; K_{Qp} 和

K_{Q_i} 分别为定无功功率控制器比例系数和积分系数, U_{dref} 和 U_{dc} 分别为直流电压参考值和实际值; Q_{ref} 和 Q 分别为无功功率参考值和实际值。

对于定无功功率外环控制器,故障后交流母线电压大幅跌落,为了给交流母线提供无功功率支撑,无功功率参考值 Q_{ref} 将增大,系统控制器快速响应,无功功率实际值 Q 随之增大,由式(1)可知, q 轴电流参考值 i_{sq}^* 的绝对值增大,当达到限幅器上限 I_{maxq}^* 时, $|i_{sq}^*|$ 不再增加,此时 $|i_{sq}^*| = I_{maxq}^*$ 。

对于定直流电压外环控制器,故障后并联侧 MMC 上、下桥臂投入 HBSM 总数不变,由于串联侧 MMC 馈入直流母线的故障电流不断增大,并联侧 MMC 上、下桥臂电抗产生同向增大的电压,直流电压实际值 U_{dc} 升高,而参考值 U_{dref} 不变,由式(1)可知, d 轴电流参考值 i_{sd}^* 的绝对值一直增加,当达到限幅器上限 I_{maxd}^* 时, $|i_{sd}^*|$ 不再增加,此时 $|i_{sd}^*| = I_{maxd}^*$ 。

在电流内环控制器的作用下,并联侧 MMC 通过改变输出电压使阀侧电流追踪参考值。故并联侧 MMC 阀侧电流参考值表达式为:

$$i_v = \sqrt{(i_{sd}^*)^2 + (i_{sq}^*)^2} \quad (2)$$

故障后并联侧 MMC 阀侧电流的最大值为:

$$i_{maxv} = \sqrt{(I_{maxd}^*)^2 + (I_{maxq}^*)^2} \quad (3)$$

并联侧 MMC 上桥臂电流 i_p 、下桥臂电流 i_n 满足:

$$\begin{cases} i_p = i_{dc}/3 + i_v/2 \\ i_n = i_{dc}/3 - i_v/2 \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可知,由于直流母线故障电流的馈入,再加上阀侧电流的增大,并联侧 MMC 桥臂电流将不断上升,当达到桥臂过流阈值时并联侧 MMC 闭锁, MMC-UPFC 完全退出运行。

2.3 故障特性验证

根据本文所建立的仿真模型进行故障特性验证,正常运行时,串、并联侧 MMC 有功功率传输方向为并联侧流向串联侧,在交流线路 MN 上距离 M 侧线路 MN 长度的 5% 处设置三相短路故障,故障时刻 $t_0=1.5$ s,故障持续时间为 0.5 s,仿真波形见附录中图 A2、A3。如图所示, $t_0=1.5$ s 发生故障, $t_1=1.5012$ s 串联侧 MMC 闭锁, $t_2=1.5038$ s 并联侧 MMC 闭锁, $t_3=1.5042$ s TBS 导通。

如图 A2 所示,故障后线路三相短路电流通过串联变压器耦合至阀侧, t_1 时刻串联侧 MMC 桥臂电流超过阈值 2.6 kA,串联侧 MMC 闭锁;由于串联侧 MMC 阀侧电压绝对值超过直流母线正、负极电压幅值,串联侧 MMC 闭锁后处于不控充电阶段,故障电流通过桥臂子模块二极管馈入直流母线,或向桥臂子模块电容充电,如图 A2(c) 所示,此阶段处于充电状态的桥臂子模块电容电压不断升高;故障后直流母线电流先过零点,然后反向增大, t_2 时刻并联侧

MMC 桥臂过流闭锁,直流电流开始衰减, t_3 时刻 TBS 导通后串联侧 MMC 阀侧电压变为 0,串联侧 MMC 桥臂电流快速衰减。

如图 A3 所示,由于故障后直流电压升高,并联侧 MMC 直流电压外环控制器控制 d 轴电流增大,同时为发出更多无功功率, q 轴电流也增大,故并联侧 MMC 阀侧电流不断增大。由于阀侧电流的增大和直流母线故障电流的馈入, t_2 时刻并联侧 MMC 桥臂发生过流闭锁, MMC-UPFC 完全退出运行。

3 基于混合型 Chopper 电路的 MMC-UPFC 故障渡越方案

根据第 2 节的 MMC-UPFC 串、并联侧 MMC 故障特性分析可知,交流系统短路时,故障电流通过串联变压器耦合至阀侧,串联侧 MMC 过流闭锁,并联侧 MMC 会受到串联侧 MMC 馈入电流的影响,实际工程中通过 TBS 快速导通隔离交流系统与串联侧 MMC 的联系。由于 TBS 导通存在固有延时,当交流系统发生严重短路故障时,并联侧 MMC 仍存在过流闭锁的风险,无法向故障后交流母线提供更多的无功功率支撑。

为实现交流系统短路故障下的 MMC-UPFC 渡越运行,即故障后并联侧 MMC 不会出现过流闭锁,抑制从串联侧通过直流母线馈入并联侧 MMC 的故障电流成为解决问题的关键。本文借鉴风电场交流故障渡越的 Chopper 电路,并结合不同运行方式对直流母线故障电流的影响,开展通过抑制馈入并联侧 MMC 的直流母线故障电流实现 MMC-UPFC 故障渡越的研究。

3.1 Chopper 电路在 MMC-UPFC 故障渡越中的适用性分析

风电场经柔性直流并网的系统,当交流电网发生严重三相短路故障时,在直流线路正、负极间接入 Chopper 电路是一种有效的交流故障渡越方案,通过控制 IGBT 触发脉冲投切 Chopper 电阻,将故障时直流系统功率差额以热能形式消耗,可以实现故障期间风电场和直流系统持续运行,故障清除后,系统恢复正常运行^[15-17]。

为实现 MMC-UPFC 故障渡越,参照风电场交流故障渡越方案,拟在直流母线正、负极之间投入 Chopper 电路,通过 Chopper 电阻吸收故障后串联侧馈入并联侧 MMC 的短路能量,下面讨论该方案的可行性。

当串联侧 MMC 闭锁后,触发 Chopper 电路,此时直流母线正、负极之间接入 Chopper 电阻,故障电流通路如图 3 所示,串联侧 MMC 馈入并联侧 MMC 的故障电流转移至 Chopper 电阻回路;并联侧 MMC 也将与 Chopper 电阻形成故障回路,由于直流侧电压降低,并联侧 MMC 桥臂子模块电容放电,并联侧 MMC

将过流闭锁,故直流母线正、负极之间仅依靠投入 Chopper 电路,显然无法实现 MMC-UPFC 的故障渡越。

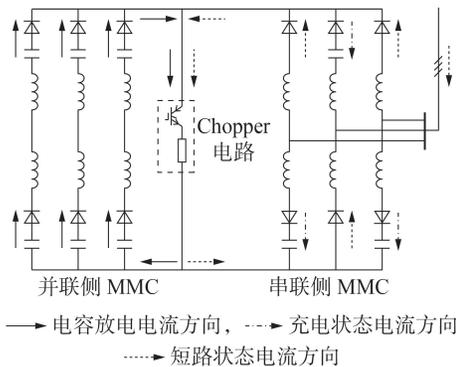


图 3 投入 Chopper 电路后 MMC-UPFC 故障电流通路

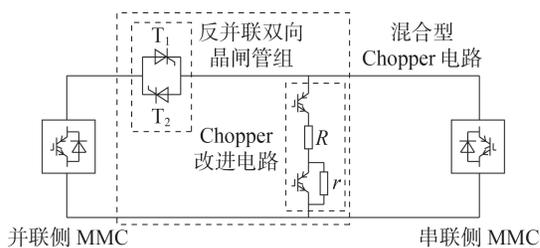
Fig.3 Fault current path of MMC-UPFC after putting into Chopper circuit

3.2 混合型 Chopper 电路

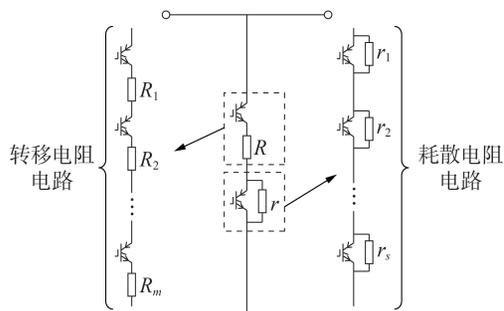
由 3.1 节分析可知,在 MMC-UPFC 直流母线正、负极间投入 Chopper 电路,并联侧 MMC 将与 Chopper 电阻形成回路导致其过流闭锁。因此,考虑通过在直流母线上串联反并联双向晶闸管组,当投入 Chopper 电路时,将并联侧 MMC 与串联侧 MMC 隔离,避免并联侧 MMC 与 Chopper 电阻形成回路并发生过流闭锁现象,从而实现 MMC-UPFC 故障渡越。

基于以上思路,本文提出的混合型 Chopper 电路见图 4。其拓扑结构见图 4(a),主要由反并联双向晶闸管组与 Chopper 改进电路这 2 个部分组成。

(1)反并联双向晶闸管组:在并联侧 MMC 直流正极母线出口串联反并联双向晶闸管组 T_1 、 T_2 ,可以



(a) 混合型 Chopper 电路拓扑结构



(b) Chopper 改进电路拓扑结构

图 4 混合型 Chopper 电路

Fig.4 Hybrid Chopper circuit

实现 MMC-UPFC 正常运行时串、并联侧 MMC 有功功率双向流通,其在故障渡越中起到隔离直流母线故障电流的作用。

(2)Chopper 改进电路:Chopper 改进电路装设在直流母线正、负极之间,由转移电阻电路与耗散电阻电路构成,拓扑结构见图 4(b)。图中 R 、 r 分别为转移电阻电路等值电阻、耗散电阻电路等值电阻。转移电阻电路、耗散电阻电路均采用模块化设计,IGBT 与转移电阻串联组成 1 个转移电阻子模块,IGBT 与耗散电阻并联组成 1 个耗散电阻子模块, m 个转移电阻子模块和 s 个耗散电阻子模块相串联构成 Chopper 改进电路。当 MMC-UPFC 正常运行时,Chopper 改进电路处于断路状态;当交流系统发生短路故障时,转移电阻投入将馈入并联侧 MMC 的直流母线故障电流转移至 Chopper 改进电路。此外,为了保证 Chopper 改进电路中 IGBT 不会过流烧毁,投入耗散电阻,与转移电阻一同吸收交流系统向串联侧 MMC 馈入的短路能量。

3.3 运行方式对直流母线电流故障特性的影响

MMC-UPFC 运行灵活,串、并联侧 MMC 有功功率可以双向流通,交流系统短路时,故障电流耦合至串联变压器阀侧,通过串联侧 MMC 馈入直流母线,不同运行方式下直流母线电流方向如图 5 所示。图中,实线箭头指示方向表示故障前串、并联侧 MMC 之间的有功功率传输方向,即故障前直流母线电流方向;虚线箭头指示方向表示直流母线故障电流方向。



图 5 直流母线电流示意图

Fig.5 Schematic diagram of DC bus current

若 MMC-UPFC 工作于运行方式 I,即串、并联侧 MMC 有功功率传输方向为并联侧流向串联侧,则故障期间馈入并联侧 MMC 的直流母线电流先过零点,然后反向增大。若 MMC-UPFC 工作于运行方式 II,即串、并联侧 MMC 有功功率传输方向为串联侧流向并联侧,则故障期间馈入并联侧 MMC 的直流母线电流将同向增大。

3.4 基于混合型 Chopper 电路的 MMC-UPFC 故障渡越方案工作原理

交流系统发生短路故障后,采用基于混合型 Chopper 电路的 MMC-UPFC 故障渡越方案后,MMC-UPFC 的动作时序如图 6 所示。

3.4.1 运行方式 I

当 MMC-UPFC 工作于运行方式 I 时,晶闸管组 T_1 导通, T_2 关断,晶闸管组 T_1 导通后,撤销其触发脉冲。假设 t_0 时刻交流系统发生短路故障,串联侧 MMC 向直流母线馈入故障电流,如图 7 所示。由于

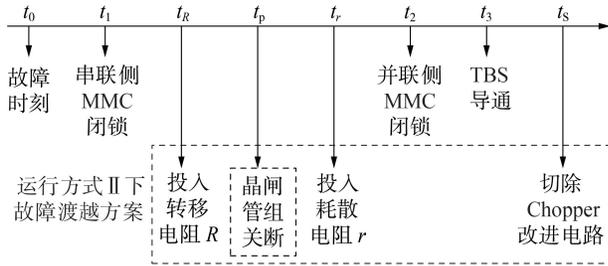


图 6 MMC-UPFC 动作时序示意图

Fig.6 Schematic diagram of MMC-UPFC action timing

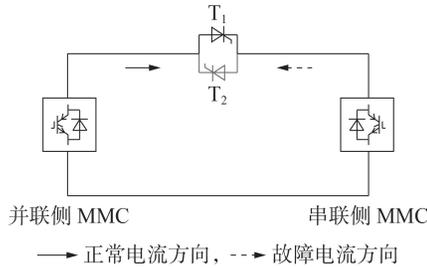


图 7 运行方式 I 下故障渡越示意图

Fig.7 Schematic diagram of fault ride through under Operation Mode I

反并联双向晶闸管组单向导通, t_p 时刻馈入并联侧 MMC 的直流母线电流反向过零点, 晶闸管组 T_1 承受反压自行关断, 串、并联侧 MMC 隔离。

以 MMC-UPFC 接入交流线路首端发生三相短路为例, 在图 1 中 k 点设置三相短路故障, 故障时刻 $t_0=1.5$ s, 故障持续时间为 0.5 s, 验证故障渡越方案的有效性, 仿真结果如图 8、附录中图 A4 所示。如图 8 所示, $t_1=1.5012$ s 串联侧 MMC 闭锁, 若无故障渡越, 馈入并联侧 MMC 的直流母线故障电流 I_b 反向过零点增大, 并联侧 MMC 在 $t_2=1.5039$ s 过流闭锁; 当采取故障渡越方案时, $t_p=1.5018$ s 馈入并联侧 MMC 的直流母线故障电流反向过零点, 晶闸管组 T_1 两端承受反向电压关断(图中 U_{T1} 为 T_1 两端电压), 串、并联侧 MMC 隔离。如图 A4 所示, 并联侧 MMC 桥臂电流不会超过闭锁阈值(2.6 kA), MMC-UPFC 切换至 STATCOM 工作模式, 并联侧 MMC 继续给接入母线

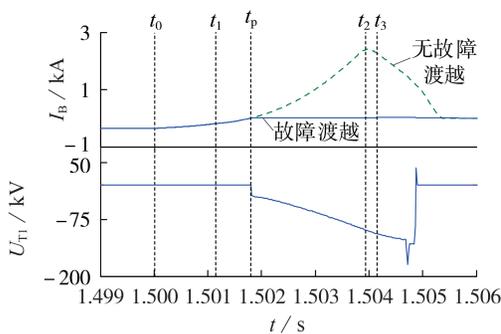


图 8 运行方式 I 下故障渡越波形

Fig.8 Waveforms of fault ride through under Operation Mode I

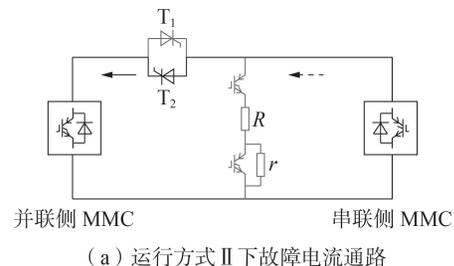
提供无功功率支撑。

3.4.2 运行方式 II

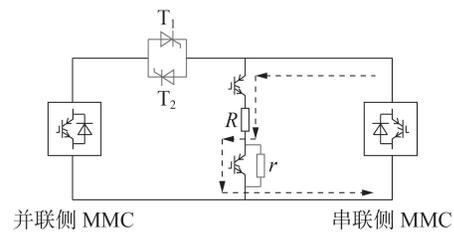
MMC-UPFC 工作在运行方式 II, T_2 导通, T_1 关断, T_2 导通后, 撤销其触发脉冲。交流系统发生短路故障时, MMC-UPFC 故障渡越方案动作时序如图 6 所示, 具体步骤如下。

(1) 假设 t_0 时刻发生故障, 直流母线故障电流如图 9(a) 所示, t_1 时刻串联侧 MMC 过流闭锁, 同时给 Chopper 改进电路中转移电阻电路与耗散电阻电路 IGBT 发送导通信号, t_r 时刻直流母线正、负极之间投入转移电阻 R 。如图 9(b) 所示, 对于并联侧 MMC, 由于晶闸管组 T_1 处于关断状态, 故投入转移电阻后并联侧 MMC 不会与 Chopper 改进电路形成回路; 对于串联侧 MMC, 由于转移电阻总阻值远小于并联侧 MMC 等效阻抗, 直流母线故障电流将通过转移电阻流回串联侧 MMC; 此时馈入并联侧 MMC 的直流母线故障电流降为 0, 串联侧 MMC 出口正极电压降低, T_2 将承受反压关断, 串、并联侧 MMC 隔离。

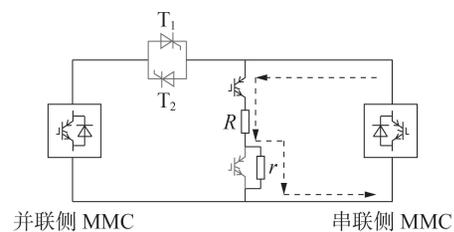
(2) 投入转移电阻 R 后, 为了保证 Chopper 改进电路 IGBT 不因过流而烧毁, 当流经 Chopper 改进电路的电流达到 2.5 kA (即 t_r 时刻) 时, 投入耗散电阻 r , 如图 9(c) 所示, 转移电阻与耗散电阻共同吸收交流



(a) 运行方式 II 下故障电流通路



(b) 转移电阻投入后故障电流通路



(c) 耗散电阻投入后故障电流通路

—> 正常电流方向, --> 故障电流方向

图 9 运行方式 II 下故障渡越示意图

Fig.9 Schematic diagram of fault ride through under Operation Mode II

系统馈入串联侧MMC的短路能量。

(3) t_3 时刻TBS导通,串联侧MMC桥臂电流开始快速衰减,当Chopper改进电路电流衰减为0(即 t_s 时刻)时,闭锁转移电阻电路IGBT,切除Chopper改进电路,故障渡越完成。

4 Chopper改进电路的电阻取值

4.1 取值原则

Chopper改进电路转移电阻用于将馈入并联侧MMC的故障电流强制转移至Chopper改进电路,为了保证流入并联侧MMC的故障电流降为0,晶闸管组 T_2 承受反压关断,转移电阻总阻值 R 不能过大;同时考虑到IGBT最大耐受电流能力,如果转移电阻总阻值 R 过小,转移电阻投入后可能导致Chopper改进电路IGBT立即过流烧毁,故要综合考虑转移电阻的取值。耗散电阻用于保证Chopper改进电路IGBT不会过流烧毁,在考虑经济性因素下,耗散电阻的总阻值 r 在保证故障渡越期间流经Chopper改进电路的故障电流不超过IGBT最大耐受电流下取最小值。

对于不同电压等级的MMC-UPFC工程,Chopper改进电路的电阻取值原则与之类似,在此不再赘述。

4.2 转移电阻取值

在图1所示的MMC-UPFC接入交流线路首端 k 点设置三相短路故障,故障时刻 $t_0=1.5$ s,故障持续时间为0.5 s,讨论Chopper改进电路中转移电阻的取值问题。

无故障渡越方案下和Chopper改进电路中转移电阻取值不同时,Chopper改进电路波形如图10所

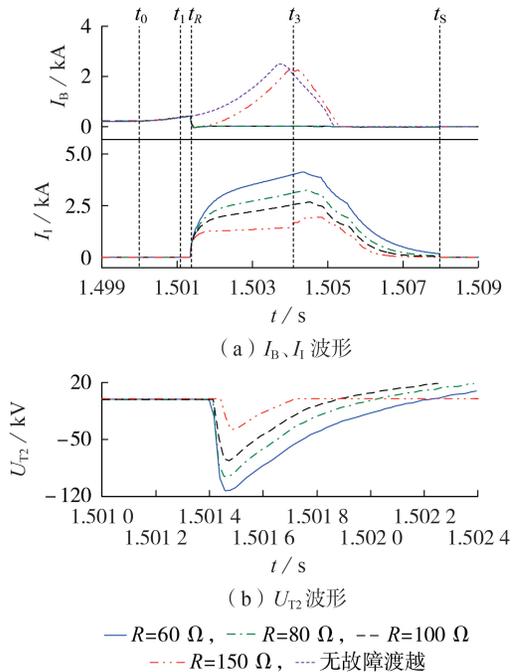


图10 Chopper改进电路波形
Fig.10 Waveforms of improved Chopper circuit

示。图中, I_1 为Chopper改进电路电流; U_{T2} 为 T_2 两端电压。当无故障渡越时,馈入并联侧MMC的直流母线故障电流同向增大,并联侧MMC在 $t_2=1.5037$ s时闭锁。当采取故障渡越方案,Chopper改进电路中转移电阻电路等值电阻 R 分别取60、80、100和150 Ω 时,串联侧MMC闭锁后, $t_R=1.5014$ s投入 R , R 越大,故障渡越期间流过Chopper改进电路的电流越小;而当 $R=150$ Ω 时, T_2 承受反向电压的时间将小于晶闸管组关断时间400 μ s, T_2 无法关断,串联侧MMC将继续向并联侧MMC馈入电流。当转移电阻总阻值过小时,流经Chopper改进电路的电流将超过IGBT最大耐受电流,故综合考虑选取100 Ω 作为转移电阻电路等值电阻值。

4.3 耗散电阻取值

选取转移电阻电路等值电阻值为100 Ω ,耗散电阻电路等效电阻值分别为10、20、30 Ω 时,Chopper改进电路电流波形如图11所示。当不投入耗散电阻时,Chopper改进电路电流超过2.5 kA, t_3 时刻TBS导通,0.5 ms后直流母线电流开始衰减;若Chopper改进电路电流超过2.5 kA时,即 t_r 时刻投入耗散电阻,当 r 为20、30 Ω 时,故障电流在耗散电阻投入后便开始衰减,考虑经济性因素下耗散电阻电路等效电阻值取为20 Ω 。

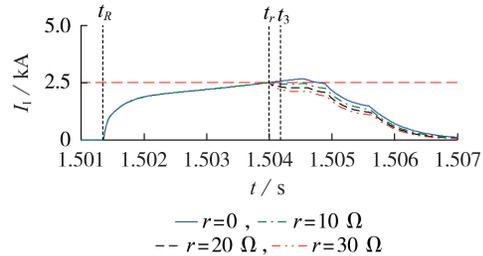


图11 Chopper改进电路电流波形

Fig.11 Current waveforms of improved Chopper circuit

当采取 $R=100$ Ω 、 $r=20$ Ω 的混合型Chopper电路故障渡越方案时,并联侧MMC波形如附录中图A5所示,并联侧MMC桥臂不会过流闭锁,MMC-UPFC切换至STATCOM工作模式,可以继续为故障后的接入母线补偿无功功率。

5 结论

本文分析了MMC-UPFC接入交流系统发生三相短路故障时,MMC-UPFC串、并联侧MMC故障特性;针对外部交流系统故障MMC-UPFC退出运行的问题,提出了基于混合型Chopper电路的UPFC故障渡越方案,得到的主要结论如下。

(1)交流系统发生三相短路,故障电流经串联变压器耦合至阀侧,串联侧MMC闭锁后处于不控充电阶段,故障电流通过直流母线馈入并联侧MMC;与此

同时,故障后并联侧 MMC 阀侧电流增大,由于 TBS 导通存在固有延时,并联侧 MMC 仍存在过流闭锁的风险,MMC-UPFC 将退出运行,无法实现故障渡越。

(2)设计了由反并联双向晶闸管组与 Chopper 改进电路构成的混合型 Chopper 电路,分析了 MMC-UPFC 在不同运行方式下,混合型 Chopper 电路工作原理。通过 Chopper 改进电路与反并联双向晶闸管组的协调配合实现串、并联侧 MMC 的有效隔离,保障 MMC-UPFC 在外部系统故障下能够顺利切换至 STATCOM 工作模式,从而实现故障渡越。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] ELSAHARTY M A, LUNA A, CANDELA J I, et al. A unified power flow controller using a power electronics integrated transformer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(3): 828-839.
- [2] 马朋,刘青,邹家平,等. UPFC 有功控制引起的交互影响研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 176-181, 223.
MA Peng, LIU Qing, ZOU Jiaping, et al. Research on interaction during active power-flow control of UPFC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 176-181, 223.
- [3] 张建坡,赵成勇. MMC-HVDC 直流侧故障特性仿真分析[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(7): 32-37.
ZHANG Jianpo, ZHAO Chengyong. Simulation and analysis of DC-link fault characteristics for MMC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(7): 32-37.
- [4] ALEXANDER A, THATHAN M. Modelling and analysis of modular multilevel converter for solar photovoltaic applications to improve power quality[J]. IET Renewable Power Generation, 2015, 9(1): 78-88.
- [5] NAMI A, LIANG J Q, DIJKHUIZEN F, et al. Modular multilevel converters for HVDC applications: review on converter cells and functionalities[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 18-36.
- [6] 杨健,蔡晖,宋鹏程,等. 采用直接电流控制策略的 MMC-UPFC 小信号模型[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(10): 123-129.
YANG Jian, CAI Hui, SONG Pengcheng, et al. Small-signal model of MMC-UPFC with direct current control strategy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(10): 123-129.
- [7] 崔福博,郭剑波,荆平,等. MMC-UPFC 接地设计及其站内故障特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7): 1628-1636.
CUI Fubo, GUO Jianbo, JING Ping, et al. The grounding design and internal fault characteristic of MMC-UPFC[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(7): 1628-1636.
- [8] 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.
- [9] 郑涛,吴丹,宋洁莹. 基于 MMC 的统一潮流控制器交流侧故障特性及保护方案[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3570-3577.
ZHENG Tao, WU Dan, SONG Jieying. The AC side fault characteristics and protection scheme of the unified power flow controller based on MMC[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3570-3577.
- [10] 曹虹,王兴国,周泽昕,等. UPFC 串联变压器匝间保护新原理研究[J]. 电网技术, 2020, 44(4): 1568-1575.
CAO Hong, WANG Xingguo, ZHOU Zexin, et al. A novel protection principle for turn-to-turn fault of UPFC series transformer[J]. Power System Technology, 2020, 44(4): 1568-1575.
- [11] 陈勇,曹伟伟,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.
- [12] 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.
- [13] 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): 8-18, 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): 8-18, 20.
- [14] 卜广全,李英彪,王姗姗,等. MMC 对交流系统三相短路故障短路电流影响的机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(21): 6303-6312.
BU Guangquan, LI Yingbiao, WANG Shanshan, et al. Analysis of the short-circuit current of MMC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(21): 6303-6312.
- [15] 董旭,张峻樾,王枫,等. 风电经架空柔性直流输电线路并网的交直流故障穿越技术[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(18): 48-55.
DONG Xu, ZHANG Junjie, WANG Feng, et al. AC and DC fault ride-through technology for wind power integration via VSC-HVDC overhead lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(18): 48-55.
- [16] 蔡婷婷,穆钢,严干贵,等. 提高海上风电场经 MMC 联网系统故障穿越能力的柔性泄能电阻控制策略[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 166-173.
CAI Tingting, MU Gang, YAN Gangui, et al. A flexible control strategy of breaking resistor to enhance fault ride through for offshore wind farm integrating to grid via MMC[J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 166-173.
- [17] 李琦,宋强,刘文华,等. 基于柔性直流输电的风电场并网故障穿越协调控制策略[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1739-1745.
LI Qi, SONG Qiang, LIU Wenhua, et al. A coordinated control strategy for fault ride-through of wind farm integration based on VSC-HVDC[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1739-1745.

作者简介:



郑涛

郑涛(1975—),男,山东济南人,教授,博士,主要研究方向为新能源电力系统保护与控制(E-mail: zhengtao_sf@126.com);

王赞鹏(1996—),男,山西晋中人,硕士研究生,主要研究方向为新能源电力系统保护与控制(E-mail: wangyupeng_1996@foxmail.com);

李厚源(1990—),男,山东淄博人,博士研究生,主要研究方向为新能源电力系统保护与控制(E-mail: lih@ncepu.edu.cn)。

(编辑 王欣竹)

(下转第 117 页 continued on page 117)

Coordinated control strategy of receiving-end multi-point cascaded hybrid DC transmission system

ZENG Rui¹, LI Baohong¹, LIU Tianqi¹, YAN Heming², MI Zhiwei²

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Global Energy Interconnection Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: When AC/DC fault occurs in receiving-end multi-point cascaded hybrid DC transmission system, the problems such as power reverse, system stability reduction caused by unbalanced current distribution are studied, a coordinated control strategy is proposed to improve the system stability. According to the line transmission power, the output power of LCC (Line Commutated Converter) at the inverter side and the steady-state output power of MMC (Modular Multilevel Converter) adopted the control of constant DC voltage, the active power command value is regulated to avoid the commutation mode of MMC adopted the control of constant DC voltage changing from inverter to rectifier, in case of the occurrence of the large-scale power transfer at the receiving-end AC side. At the same time, after the fault is cleared, the large-scale fluctuation problem in the system recovery process can be alleviated, and the system can quickly and smoothly recover to the rated operation state. The simulation model is built based on PSCAD/EMTDC, the simulative results show that the proposed coordinated control strategy can decrease the voltage and power fluctuation, the system can realize smooth transition under typical AC and DC faults, and the stability of the receiving-end system is improved.

Key words: multi-point; cascaded; DC transmission; MMC; control strategy

(上接第103页 continued from page 103)

Fault ride through scheme of MMC-UPFC based on hybrid Chopper circuit

ZHENG Tao, WANG Yunpeng, LI Houyuan, LÜ Wenxuan, ZHANG Chengqi, MA Jiaxuan

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,
North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

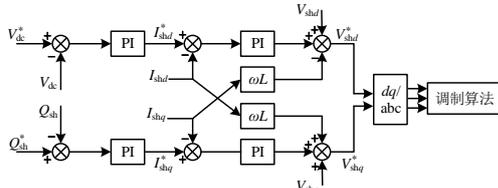
Abstract: The MMC-UPFC (Modular Multi-level Converter based Unified Power Flow Controller) will suffer fault impact in both series side and shunt side when a short circuit occurs in its AC system, leading to over-current blocking of MMCs in both sides and the risk of MMC-UPFC out of service. Taking three-phase short circuit fault as an example, the fault characteristics of MMCs on both series and shunt sides are analyzed. On this basis, a fault ride through scheme of MMC-UPFC based on hybrid Chopper circuit is proposed with referring to Chopper circuit in wind farm AC fault ride through, as well as combining with the effects of different MMC-UPFC operation modes on fault characteristics. The proposed scheme can isolate the connection between the shunt side MMC and the series side MMC after fault occurs, so as to suppress the fault current fed from the series side into shunt side MMC. Simulative results show that the proposed scheme can avoid the blocking of shunt side MMC under different MMC-UPFC operation modes, and the MMC-UPFC can serve as static synchronous compensator and provide reactive power to AC system.

Key words: UPFC; MMC; electric converters; three-phase short circuit in AC system; fault ride through; hybrid Chopper circuit

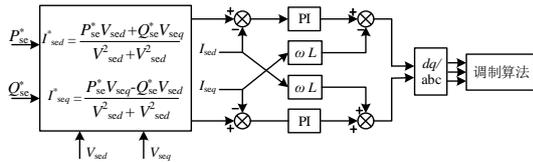
表 A1 仿真系统参数

Table A1 Main parameters of simulation system

参数	数值
系统电压/kV	500
直流电压/kV	180
串、并联侧 MMC 容量/(MV A)	250
并联变漏抗/%	10
串联变漏抗/%	20
并联变绕组变比/kV (Y θ / Δ /Y)	505/36/94
串联变绕组变比/kV (III (开口 Y) / Δ /Y)	43.5/36/105
串并联变压器阀侧中性点接地电阻/ Ω	2 000



(a) 并联侧 MMC 控制框图



(b) 串联侧 MMC 控制框图

注: V_{dc}^* 、 V_{dc} 和 Q_{sh}^* 、 Q_{sh} 分别为直流电压、并联侧无功功率参考值和实际值; V_{shd}^* 、 V_{shq}^* 和 I_{shd} 、 I_{shq} 分别为并联侧 d 、 q 轴电压和电流实际值; P_{sc}^* 和 Q_{sc}^* 分别为串联侧有功功率和无功功率参考值; V_{scd} 、 V_{seq} 和 I_{scd} 、 I_{seq} 分别为串联侧 d 、 q 轴电压和电流实际值。

图 A1 MMC-UPFC 串、并联侧 MMC 控制框图

Fig.A1 Block diagrams of series and shunt side MMC in

MMC-UPFC

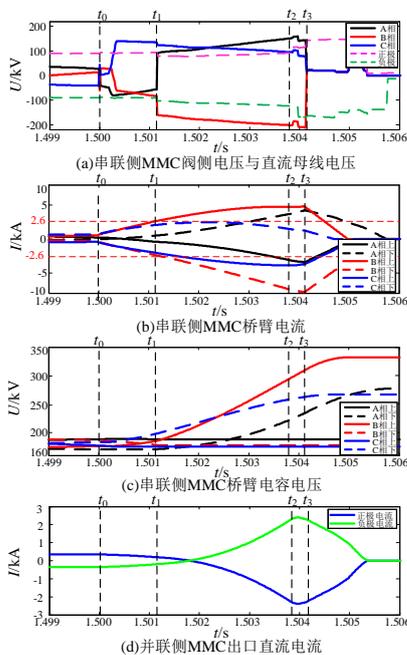


图 A2 串联侧 MMC 故障波形

Fig.A2 Waveforms of series side MMC under fault

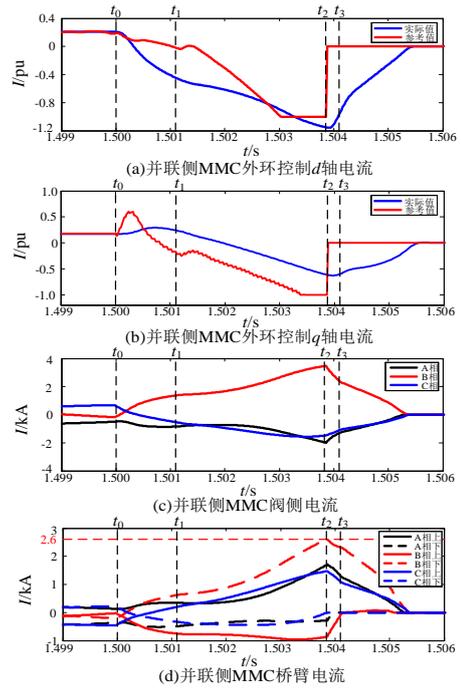


图 A3 并联侧 MMC 故障波形

Fig.A3 Waveforms of shunt side MMC under fault

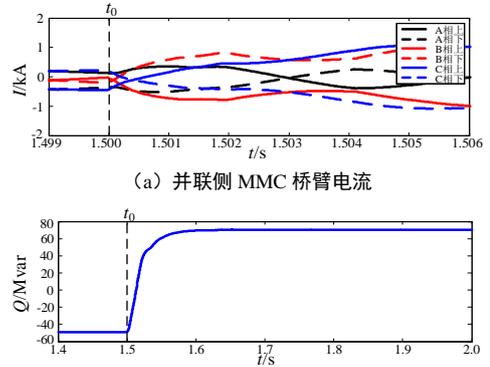


图 A4 运行方式 I 下故障渡越并联侧 MMC 波形

Fig.A4 Waveforms of shunt side MMC under fault ride through

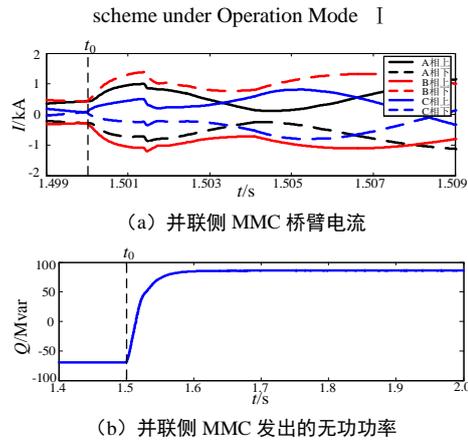


图 A5 运行方式 II 下故障渡越并联侧 MMC 波形

Fig.A5 Waveforms of shunt side MMC under fault ride through

scheme under Operation Mode II