

基于电阻耗能支路的 MMC-HVDC 线路故障清除与重启恢复策略

张烜一^{1,2}, 江修波¹, 郑文迪¹, 晁武杰², 李超²

(1. 福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108; 2. 国网福建省电力有限公司电力科学研究院, 福建 福州 350007)

摘要:结合直流断路器特性的模块化多电平换流器(MMC)改造是实现直流故障清除经济可行的方案之一,在此背景下,提出一种基于电阻耗能支路的 MMC 改造方案。在实施该方案时,通过 MMC 与附加端口、线路的电阻耗能支路和关断隔离支路之间的相互配合,实现故障电流快速转移和衰减。此外,该方案利用流过线路电阻耗能支路开关模块的电流,准确判定故障类型,并提出故障线路的重启恢复策略。最后,在 PSCAD 中建立双极直流输电(MMC-HVDC)系统,验证所提方案和故障线路重启恢复策略的有效性。仿真结果表明:所提方案故障清除时间短且故障电流峰值较小,故障线路重启过程平稳可靠。

关键词:柔性直流输电;直流线路故障清除;故障线路恢复;模块化多电平换流器

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.06.008 中图分类号:TM721.1 文章编号:1673-9140(2021)06-0067-10

MMC-HVDC line fault clearing and restart recovery strategy based on the resistance energy-consuming branch

ZHANG Xuanyi^{1,2}, JIANG Xiubo¹, ZHENG Wendi¹, CHAO Wujie², LI Chao²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. Electric Power Science Research Institute, State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350011, China)

Abstract: The modular multilevel converter (MMC) modification combined with the characteristics of DC circuit breakers is one of the economical and feasible solutions to realize the DC fault clearing. Under the background, this paper proposes a MMC modification program based on resistance energy-consuming branches. The scheme realizes the rapid transfer and attenuation of the fault current through the mutual cooperation between the MMC and the additional ports and the resistance energy consumption branch of the line and the shut-off isolation branch. In addition, this solution utilizes the current flowing through the switch module of line resistance energy-consuming branch to accurately determine the fault type, and proposes a restart recovery strategy for the faulty line. Finally, a bipolar direct current transmission (MMC-HVDC) system is established in PSCAD to verify the effectiveness of the proposed scheme and the restart recovery strategy of faulty lines. The simulation results show that the proposed scheme has a short fault clearing time and a small fault peak value, and the fault line restart process is stable and reliable.

Key words: flexible HVDC; fault clear of DC line; recovery of fault line; modular multilevel converter(MMC)

收稿日期:2020-07-22;修回日期:2020-12-08

基金项目:福建省自然科学基金(2017J01480);国网福建省电力有限公司科技项目(52130417000K)

通信作者:江修波(1960-),男,教授,主要从事电力系统运行技术研究;E-mail:1102517160@qq.com

随着电力电子技术的不断进步,柔性直流输电技术朝着高电压、远距离、大容量的趋势发展^[1-2]。采用架空线路进行电力传输更有利于提高直流输电能力^[3],同电缆线路相比更具经济性。但架空线路在实际运行中容易发生短路故障^[4],而现有柔性直流工程的模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的子模块大都采用半桥型结构,不具有直流侧故障清除能力^[5],若不采用有效的措施,则会给 MMC 系统带来严重损害和经济损失。

目前,针对这一问题国内外学者提出了大量的研究方案^[5-6],其中,结合直流断路器特性的 MMC 改造思路^[6-7]是在换流器结构的基础上通过新增几条辅助电路,并利用相关控制策略实现二者之间协调配合,从而达到故障清除的目的。这一思路同目前广泛研究的混合直流断路器方案^[8-10]和利用具有故障清除能力子模块方案^[11-13]实现故障清除相比,经济性好且无需对现有工程进行较大的改造。

基于这一思路,文献[14]提出一种集成直流断路器功能的 MMC 改造结构,利用子模块双向旁路开关与能量吸收支路相互配合,但故障清除时间较长,故障清除完成后没有对转移支路中电容能量泄放进行研究;文献[15]提出一种双电流转移支路故障清除策略,利用双路电容器组之间的相互切换进行故障清除后电容器能量泄放,但电容器的选取较难,需要对两电容器之间的充放电进行分析,且提出的重合闸判定仅适用于故障电流在耗能支路衰减过程中消失才有效;文献[16]通过晶闸管组成的桥臂转移支路来消耗故障清除过程桥臂的电感电流,桥臂转移支路电流需电流过零点时才能关断,影响故障清除时间。此外,桥臂转移支路分散在每相交流出口,增加了实际安装和维护管理成本。文献[17]进一步改进桥臂转移支路,提高桥臂转移支路电流关断时间,但桥臂转移支路分散在 6 个桥臂上,安装和维护成本增加。以上这些方案更多集中在直流故障清除研究上,对故障线路恢复策略还有待深入分析。

因此,该文在已有研究的基础上提出一种基于电阻耗能支路的 MMC-HVDC 直流故障清除改造方案。不同于文献[14-17]之处,所提方案使用耗能电阻进行短路故障电流衰减,无需电容复杂的充放

电过程,参数设计简单,且所增加支路集中在端口处,工程上维护管理方便。并基于所提 MMC 改造方案提出故障线路重启恢复策略,在具有良好经济性和故障清除能力的同时提高柔性直流输电系统的可靠性。

该文首先对所提的 MMC 改造方案进行介绍,详细分析其故障清除原理和附加支路的参数计算方法,接着对所提故障类型判定和故障线路重启过程进行详细分析。最后,基于 PSCAD/EMTDC 软件仿真验证所提方案的有效性。

1 基于电阻耗能支路的 MMC 改进结构及故障清除原理

1.1 基于电阻耗能支路的 MMC 改进拓扑

基于电阻耗能支路的改进 MMC 整体结构如图 1 所示。

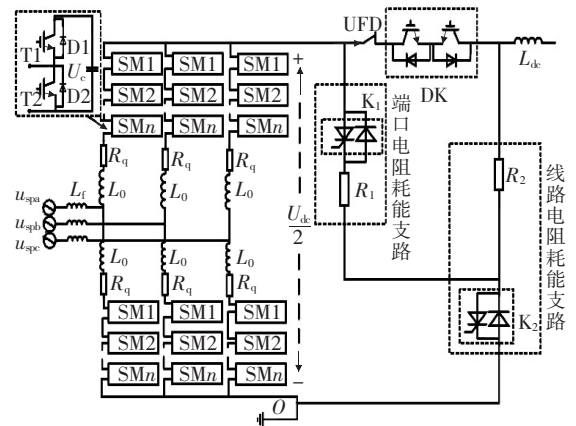


图 1 基于电阻耗能支路的改进 MMC 结构

Figure 1 Improved MMC structure based on resistance energy-consuming branch

图 1 中 MMC 每个桥臂上的 L_0 和 R_q 分别表示桥臂电感和桥臂电阻。桥臂子模块 SM_n 由 2 个开关管 T1、T2 组成, D1、D2 为对应开关管的反并联二极管, U_c 为子模块电容电压值, 端口处为线路平波电抗器 (L_{dc})。所提的 MMC 改造方案在此基础上增加了电阻耗能支路以及具有直流断路器特性的关断隔离支路, 其中, 关断隔离支路由快速机械开关 (ultra-fast disconnector, UFD) 和若干反串联 IGBT 器件构成的辅助隔离开关 DK 模块组成, 起到将故障电流向电阻耗能支路转移的作用, 为快速机

械开关 UFD 的零电流关断提供条件,其关断速度一般为 2 ms 左右^[15-17]。电阻耗能支路加装在 MMC 阀端口和直流线路侧,电阻耗能支路上 K_1 、 K_2 模块由若干晶闸管与续流二极管并联和耗能电阻 R_1 串联构成,该文称为转移开关。当转移开关 K_1 中的晶闸管为门极可断晶闸管 (gate turn-off thyristor, GTO) 时,故障清除过程中一方面能消耗故障电流并为隔离故障线路提供条件,另一方面在故障清除后进行故障类型判别,为故障线路重启创造条件。

此外,可在交流侧串联交流电抗器 (L_f),用于控制故障清除期间 MMC 桥臂电流幅值,防止交流侧流入三相短路电流造成 MMC 桥臂的过流,进而降低阀内电力电子器件因过流而损坏的可能性。

1.2 基于电阻耗能支路的 MMC 直流故障清除过程

以真双极 MMC-HVDC 系统的一极 MMC 换流器为基础,对该文所提改进 MMC 换流器的直流侧故障清除过程进行分析。当系统正常运行时,关断隔离支路中的 UFD、DK 模块导通,转移开关 K_1 、 K_2 关断,附加损耗仅包含 DK 模块中开关管的导通损耗,可忽略不计。当发生直流侧短路故障后,故障清除过程等效电路如图 2 所示, R_{line} 、 L_{line} 为故障线路等效电阻和电感,整个故障清除过程可以分为直流故障初始、直流故障转移以及故障清除 3 个阶段。

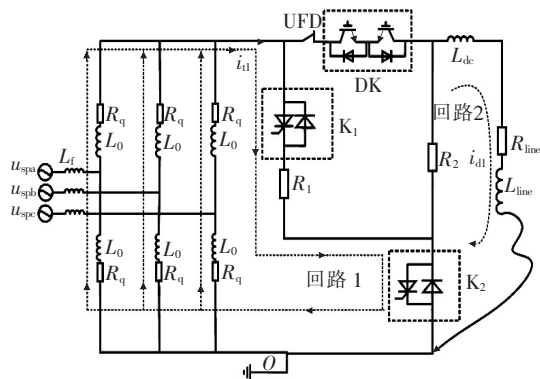


图 2 MMC 直流故障清除过程等效示意

Figure 2 Equivalent diagram of MMC DC fault clearing process

1) 直流故障初始阶段。假设 t_0 时刻发生直流短路故障,此时每相桥臂可等效为 RLC 串联电路,短路故障电流通过关断隔离支路向故障点馈入。

2) 直流故障转移阶段。 t_1 时刻设备检测到短路故障后关断每个子模块的开关管 T1,保持开关管 T2 导通,使三相交流系统相当于短路,无法向故障点馈入故障电流^[15],故障电流仅由桥臂电感电流构成; t_2 时刻关断 DK 模块并同时触发导通转移开关 K_1 、 K_2 ,故障电流通过图 2 中回路 1、2 快速衰减; t_3 时刻 UFD 在关断隔离支路电流为 0 再经 2 ms 后关断,故障线路隔离; t_4 时刻闭合 DK 模块。

3) 直流故障清除阶段。经过短暂时间阀侧故障电流在 t_5 时刻近似衰减至 0 后,在 t_6 时刻闭锁 MMC 子模块,转移开关 K_1 、 K_2 在 $t_5 - t_6$ 期间关断。线路侧故障电流在 t_7 时刻衰减至 0,此时直流故障清除过程结束,等待系统重启恢复正常运行。

整个系统的故障清除过程控制时序如图 3 所示。以线路侧故障电流最后衰减至 0 为例,在控制时序中,故障电流检测延迟时间 ($t_1 - t_0$) 约为 1~2 ms^[15],导通转移开关 K_1 、 K_2 与关断辅助隔离开关 DK 动作持续时间为 $t_2 - t_1$,UFD 关断动作持续时间为 $t_3 - t_2$,DK 导通动作持续时间为 $t_4 - t_2$,关断转移开关 K_1 、 K_2 与闭锁子模块延迟时间为 $t_6 - t_5$,阀侧故障电流衰减持续时间为 $t_5 - t_2$,直流线路故障电流衰减持续时间为 $t_7 - t_2$ 。在 MMC 系统参数设计不变的情况下,可设置直流故障清除时间在一个周波 20 ms 以内^[18]。

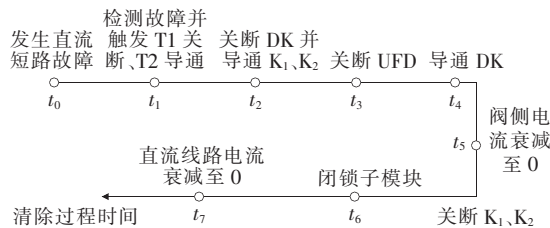


图 3 系统故障清除过程控制时序

Figure 3 Control sequence of system fault clearing process

2 基于电阻耗能支路的 MMC 故障清除参数设计

2.1 端口耗能支路电阻 R_1 参数

由文 1.2 中分析可知,当故障清除进入直流故障转移阶段后,MMC 每相桥臂电感电流经过端口电阻耗能支路上的耗能电阻 R_1 快速衰减,此时三

相桥臂等效为 RL 回路,如图 4 所示, i_{t1} 为端口耗能支路电流,其计算公式为

$$i_{t1} = I_{t10} \exp\left(-\frac{t-t_{n0}}{\tau_1}\right) \quad (1)$$

式中 t_{n0} 为 K_1 、 K_2 模块导通瞬间时刻; I_{t10} 为 t_{n0} 时刻端口耗能支流电流瞬时值,其衰减时间常数:

$$\tau_1 = \frac{2L_0}{2R_q + 3R_1} \quad (2)$$

由式(2)可知,在系统桥臂电感、桥臂电阻参数不变的情况下,阀侧桥臂电感电流衰减速度主要取决于耗能电阻 R_1 , R_1 值越大衰减速度越快。

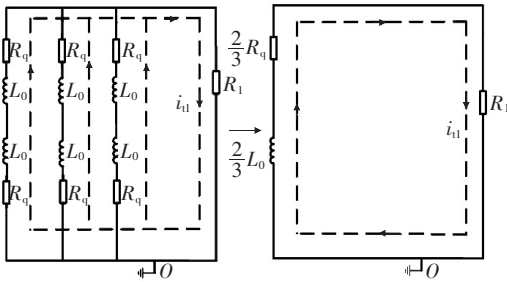


图 4 阀侧短路电流衰减等效示意

Figure 4 Equivalent diagram of valve side short-circuit current attenuation

假设 i_{t1} 在 $t = t_f$ 时衰减到零,通常近似认为需 5 倍衰减时间常数的时间^[16],则耗能电阻应满足:

$$R_1 \geq \frac{10L_0}{3t_f} - \frac{2}{3}R_q \quad (3)$$

式中 t_f 为阀侧桥臂电感电流值衰减到 0 时刻。

当耗能电阻 R_1 参数确定后,由于端口耗能支路电流 i_{t1} 呈指数衰减,选取 1~2 倍的安全裕度,则可知 R_1 允许的耗能功率参数设计公式为

$$P_{R1} \geq (1 \sim 2)I_{t10}^2 R_1 \quad (4)$$

2.2 线路耗能支路电阻 R_2 参数

根据分析,线路耗能支路上的直流线路短路故障电流衰减过程同样等效为 RL 回路,如图 5 所示, i_{d1} 为直流故障电流值,计算公式为

$$i_{d1} = I_{d10} \exp\left(-\frac{t-t_{m0}}{\tau_2}\right) \quad (5)$$

式中 t_{m0} 为 K_1 、 K_2 导通瞬间时刻; I_{d10} 为 t_{m0} 时刻线路故障电流瞬时值,其衰减时间常数:

$$\tau_2 = \frac{L_{dc} + L_{line}}{R_2 + R_{line}} \quad (6)$$

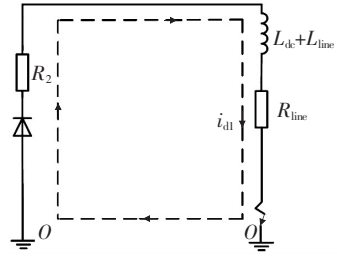


图 5 直流线路短路电流衰减等效示意

Figure 5 Equivalent diagram of DC line short-circuit current attenuation

同阀侧耗能支路类似,假设 i_{d1} 在 $t = t_x$ 时线路故障电流衰减到零,则耗能电阻应满足:

$$R_2 \geq \frac{5(L_{dc} + L_{line})}{t_x} - R_{line} \quad (7)$$

式中 t_x 为直流故障电流衰减到 0 时刻。

参考式(4),耗能电阻 R_2 允许的耗能功率参数设计公式为

$$P_{R2} \geq (1 \sim 2)I_{d10}^2 R_2 \quad (8)$$

2.3 辅助隔离开关 DK 中开关器件数量决定因素分析

由图 2 可以分析,在直流故障电流转移阶段,当机械关断开关 UFD 未关断前,辅助隔离开关 DK 承受电压为

$$U_{DK} = U_{R1} + U_{R2} \quad (9)$$

式中 U_{R1} 、 U_{R2} 分别为耗能电阻 R_1 、 R_2 两端电压。

根据回路 1、2 可以得出:

$$U_{DK} = i_{t1}R_1 + i_{d1}R_2 \quad (10)$$

由式(1)和(5)可知,在直流故障电流转移阶段, i_{t1} 、 i_{d1} 呈指数衰减,进而可得:

$$U_{DKmax} = I_{t10}R_1 + I_{d10}R_2 \quad (11)$$

根据式(11)推论,辅助隔离开关承受电压取决于 R_1 、 R_2 值,且承受电压的最大值在直流故障电流转移阶段的初始时刻,从而可确定 DK 中开关器件所需要的数量。

2.4 交流电抗器 L_f 参数

当处于直流故障转移阶段后,此时交流系统相当于三相对称短路,该文以 MMC 中 B 相上桥臂电流为例进行分析,其桥臂电流回路如图 6 所示,交流电源相电压为 $u_{spb} = \sqrt{2}U_{spb} \sin(\omega t - 120^\circ)$, ω 为其工频角频率。

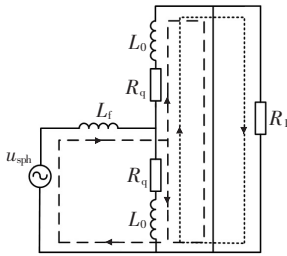


图 6 MMC 的 B 相桥臂电流回路等效示意

Figure 6 Equivalent diagram of B-phase bridge arm current loop of MMC

由图 6 进行电路分析可知,MMC 换流器 B 相上桥臂电流等效为交流系统短路电流和桥臂电感 L_0 放电电流的叠加^[16],即

$$i_{qbp} = \frac{\sqrt{2}U_{spb}}{\sqrt{\frac{1}{4}R_q^2 + \omega^2(L_f + \frac{1}{2}L_0)^2}} \cdot$$

$$\sin(\omega t - 120^\circ - \delta) + \frac{1}{3}I_{t10} \exp\left(-\frac{t - t_{n0}}{\tau_1}\right) \quad (12)$$

式中 i_{qbp} 为 MMC 换流器 B 相上桥臂电流, $\delta = \arctan\left[\frac{\omega(L_f + 0.5L_0)}{0.5R_q}\right]$ 。

假设子模块 IGBT 允许流过最大电流幅值为 I_{maxqj} , 则故障期间允许桥臂电流幅值可以近似为

$$\frac{\sqrt{2}U_{spb}}{\sqrt{\frac{1}{4}R_q^2 + \omega^2(L_f + \frac{1}{2}L_0)^2}} + \frac{1}{3}I_{t10} < I_{maxqj} \quad (13)$$

结合实际工程相关参数可由式(13)计算出交流电抗器 L_f 参数。值得说明的是,从式(13)可以看出,桥臂电流的幅值还与 L_0 、 R_q 相关,因此,可以综合考量实际设备成本来设计 L_f 、 L_0 和 R_q 更为经济的参数值(因篇幅关系该文没有涉及)。

3 直流线路故障重启恢复控制策略

3.1 基于电阻耗能支路的线路故障清除判定

对于采用架空线路的直流输电工程,直流线路故障往往是瞬时性的,该文提出基于电阻耗能支路的直流故障清除判定策略,分为 2 种情况,其过程等效电路如图 7 所示。

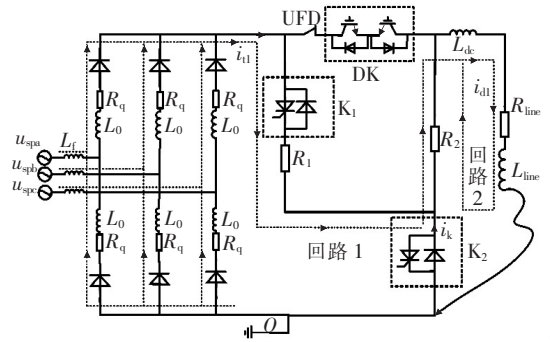


图 7 系统故障清除判定过程等效示意

Figure 7 Equivalent diagram of system fault clearance determination process

情况 1 在直流线路电流衰减阶段中,直流短路故障消失,此时线路电阻耗能支路上电流降为 0,可以直接判定为暂时性故障并进行故障线路恢复。

情况 2 在直流线路故障电流衰减至零后,此时 K_2 处于关断状态。通过导通 K_1 ,当故障未清除时(图 7),短路电流通过回路 1 向故障点馈入,并经过短暂时关断 K_1 ,流过转移开关 K_2 的电流 i_k 将快速上升至峰值后由耗能电阻 R_2 作用衰减。如果故障消失后,导通 K_1 ,由于子模块闭锁,此时故障线路两端 MMC 相当处于启动过程的不控整流阶段,直流线路电流为 0,根据回路电流法可知 i_k 也为 0。因此,可以根据流过转移开关 K_2 的电流 i_k 是否为 0 来判断故障消失与否。

3.2 基于电阻耗能支路的故障线路恢复策略

当保护系统判定直流线路故障清除后,应进行相应的重合闸以恢复故障线路的电力传输,快速机械开关 UFD 通常在系统进行重合闸时需零电压下方可闭合^[18]。重合闸过程如图 8 所示, U_{fd} 为 UFD 两端电压, U_{dc1} 为 MMC 直流端口电压, U_{dc2} 为直流线路对地电压。此时由于 K_2 处于关断状态, K_1 、 DK 处于导通状态,根据电路分析可知, UFD 两端电压:

$$U_{fd} = U_{dc1} - U_{dc2} = i_{d1}R_2 \quad (14)$$

因此,由文 3.1 中分析可知,当故障线路清除后线路电阻耗能支路上电流 i_{d1} 值为 0, UFD 两端电压 U_{fd} 也为 0, UFD 闭合。

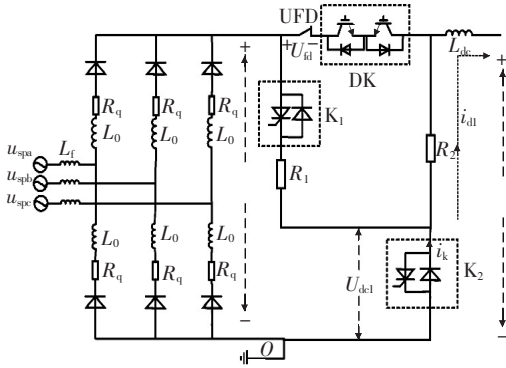


图 8 UFD 零电压闭合过程等效示意

Figure 8 Equivalent diagram of UFD zero voltage closing process

故障线路重启恢复流程如图 9 所示。重启过程中将 MMC 定有功功率控制给定值降为 0, 当系统解锁恢复并待直流母线电压达到设定值附近后, 整流侧定有功功率给定值通过斜率控制上升, 减小重启过程对系统冲击, 该过程近似于系统启动过程中的可控充电以后阶段。恢复过程中当进行故障清除判定情况 2 时, 闭合 K_1 并经短暂延时关断后, 转移开关 K_2 的电流 i_k 上升, 则说明故障未清除, 应等待一定去游离时间后再次重启, 进行故障清除判定, 去游离时间通常为 0.1~0.5 s, 重启次数设置为 1~5 次^[19], 当重启次数超过设定值则判断为永久性故障, 对故障线路进行检修。

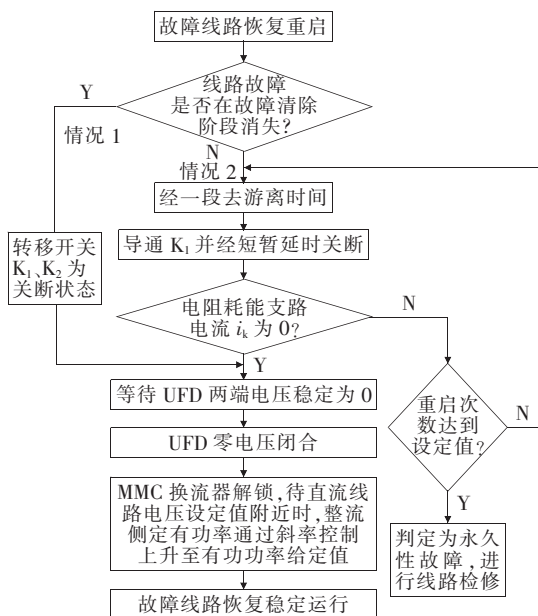


图 9 直流故障线路恢复控制策略流程

Figure 9 Flow chart of DC fault line recovery control strategy

4 仿真分析

4.1 仿真模型建立与参数设置

该文在 PSCAD/EMDTDC 软件中搭建基于架空线路的双端双极 MMC-HVDC 系统, 模型如图 10 所示, 其中, MMC1、MMC2 控制方式为定直流电压和定无功功率, MMC3、MMC4 控制方式为定有功功率和定无功功率, 模型参数如表 1 所示。考虑实际工程电平数较多时仿真效率低, 故建立 21 电平仿真系统, 并不影响所提方案在电平数较多时的应用。根据文 2 中的参数设计和仿真分析, 并假设整条线路故障清除在 20 ms 内, 仿真系统取电阻耗能支路的 R_1 为 15 Ω , R_2 为 50 Ω 。架空线路采用基于频率相关相域模型。

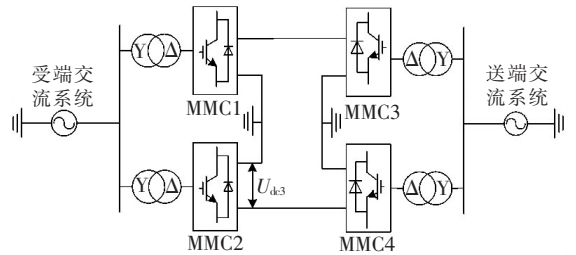


图 10 双端双极 MMC-HVDC 系统模型

Figure 10 Schematic diagram of the double-ended bipolar MMC-HVDC system model

表 1 双端双极 MMC-HVDC 输电系统仿真参数

Table 1 Simulation parameters of double-ended bipolar MMC-HVDC transmission system

仿真系统部分参数	单位	参数值
交流系统额定电压	kV	230
交流系统额定频率	Hz	50
换流变压器额定变比(Y/ Δ)	kV/kV	230/166.57
控制方式	MW/MW	600/0
	kV/MW	$\pm 320/0$
输电架空线路长度	km	100
直流线路平波电抗	mH	50
交流电抗	mH	80
桥臂电抗	mH	60
子模块电容	mF	10
单桥臂子模块个数	个	20

4.2 系统直流线路故障清除仿真分析

在离逆变侧 MMC1 端口 30 km 处,假设 $t = 6.5\text{ s}$ 时直流正极短路故障发生,以 MMC1 的故障清除过程为例进行分析,仿真结果如图 11 所示。

从图 11(a)可知,当故障发生 1 ms 后, t_1 时刻故障电流上升至峰值 1.65 kA, $t_2 = 6.5015\text{ s}$ 时辅助隔离开关 DK 关断,关断隔离支路电流降为 0。由图 11(d)和(e)可知,2条耗能支路电流分别约在

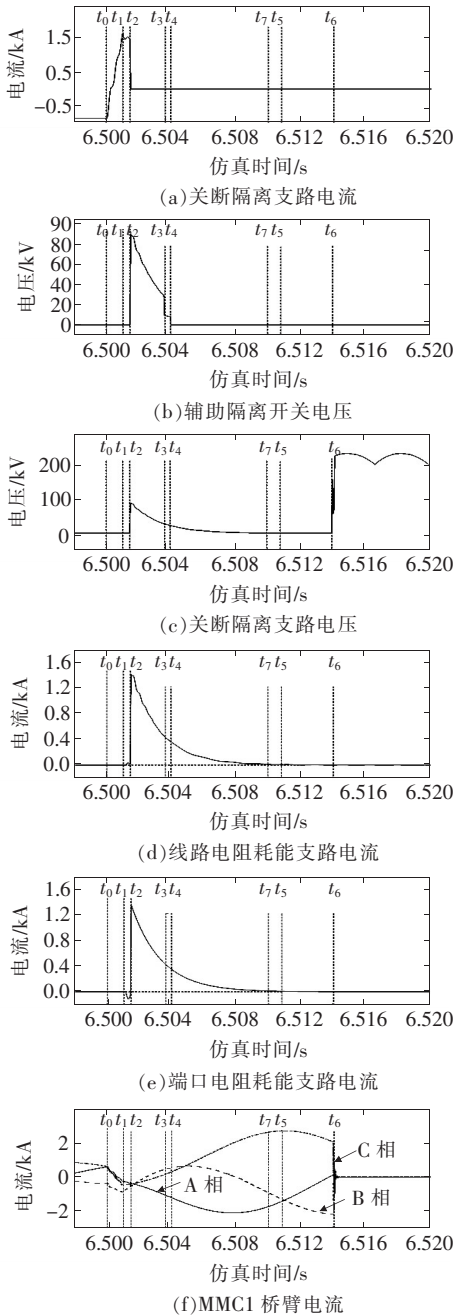


图 11 直流故障清除过程仿真波形

Figure 11 Simulation waveform diagram of DC fault clearing process

$t_7 = 6.510\text{ s}$ 、 $t_6 = 6.511\text{ s}$ 时各支路电流衰减至 0,由于故障点离 MMC1 系统较近,直流侧故障电流衰减快于阀侧。由图 11(b)和(c)可知,当 $t > t_2$ 时,关断隔离支路电压为辅助隔离开关 DK 两端电压,承受 2 条耗能支路上耗能电阻电压,随着耗能支路电流的衰减,DK 两端电压降低,当 $t_3 = 6.5036\text{ s}$ 时,快速机械开关 UFD 关断,故障线路隔离,DK 电压进一步降低,在 $t_4 = 6.504\text{ s}$ 时,DK 上 IGBT 导通后电压降为 0,与文 2 中分析一致。从图 11(f)中可以看出,仿真在 $t_6 = 6.514\text{ s}$ 闭锁子模块,三相短路电流消失,即该文设置直流故障隔离与清除阶段在故障发生 14 ms 后结束。以上仿真分析验证了所提直流故障清除改造方案有效性。

4.3 直流故障线路恢复控制策略仿真分析

为了验证文 3 中所提故障线路恢复策略的正确性,在直流故障清除仿真基础上,假设线路发生持续时间为 0.2 s 的瞬时性故障,即仿真以故障线路恢复策略中判定较为复杂的情况 2 为例。

1)故障清除判定仿真分析。假设系统在 $t = 6.620\text{ s}$ 进行第 1 次故障清除判定,由图 12 可知,仿真设置转移开关 K_1 模块导通并待 1.5 ms 后关断,此时流过 K_2 模块电流迅速上升,可判定故障未消失。

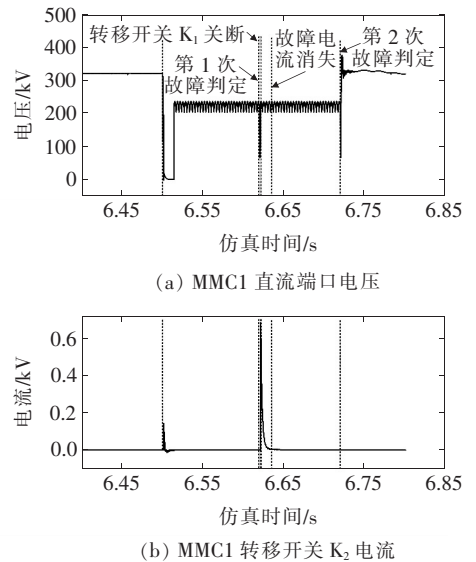


图 12 直流故障清除判定过程仿真波形

Figure 12 Simulation waveform diagram of DC fault clearing judgment process

当过去游离时间后,设在 $t = 6.720$ s 进行第 2 次故障清除判定,此时 K_2 模块电流为 0,可知直流故障消失。通过以上分析验证该文所提故障清除判定方法的有效性,且判定依据简单可靠。

2)快速机械开关 UFD 重合闸过程仿真分析。从图 13 中 UFD 两端电压波形可以看出,当 $t = 6.720$ s 时导通 K_1 模块进行故障清除判定,UFD 两端电压快速下降,由于电阻耗能支路有小波动,电压会降低到一个很小值,仿真在 $t = 6.721$ s 时 UFD 两端电压稳定为 0,进而快速机械开关 UFD 在 $t = 6.722$ s 时闭合。

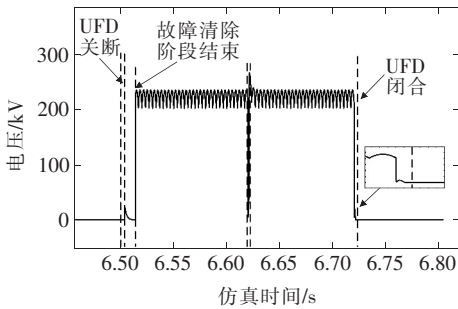


图 13 快速机械开关 UFD 电压波形

Figure 13 UFD voltage waveform diagram of fast mechanical switch

3)故障线路重启恢复过程仿真分析。重启恢复过程仿真中 MMC3 的有功功率给定值设定为 0,设 $t = 6.720$ s 时导通转移开关 K_1 ,当 $t = 6.722$ s 快速机械开关 UFD 两端闭合同时关断 K_1 ,并在 $t = 6.7225$ s 时解锁故障线路两端 MMC 子模块,待线路直流电压达到给定值 320 kV 附近后,MMC3 在 $t = 6.8$ s 将有功功率给定值经斜率控制上升,设上升斜率为 1 000,即当 $t = 7.1$ s 时 MMC3 有功功率上升至给定值 300 MW,故障极系统恢复,仿真结果如图 14、15 所示。

从图 14(a)可知,当 MMC1、MMC3 子模块解锁后,极直流电压快速上升并经过一段时间振荡达到给定电压值,对非故障极来说只有轻微波动后并保持额定电压稳定运行,几乎不受影响。由图 14(c)可知故障线路重启过程桥臂电流波动较小,不会对桥臂上 IGBT 造成较大冲击。从图 14(b)和图 15 可以看出故障线路重启过程中,无功功率最终稳定

在 0 MW,有功功率和直流电流以一定斜率平稳上升至稳态值,避免出现过冲现象。仿真重启 2 次过程持续时间约 0.5 s,实际工程考虑快速性可根据调试情况缩短去游离时间、有功功率上升时间。以上仿真分析验证了所提故障线路重启恢复策略的有效性。

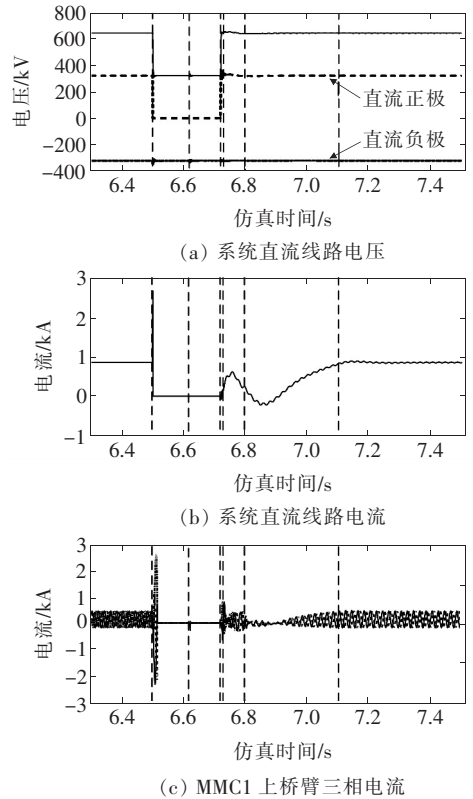


图 14 故障线路重启恢复过程波形

Figure 14 Waveform diagram of fault line restart recovery process

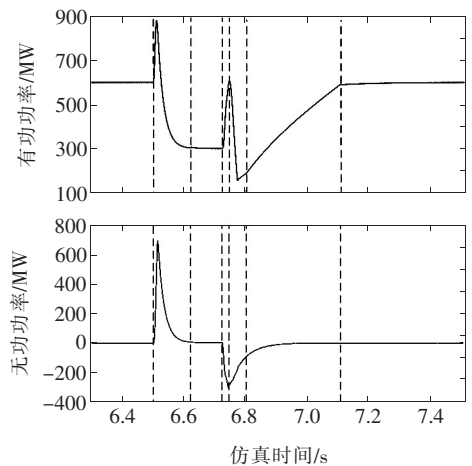


图 15 系统整流侧有功功率和无功功率波形

Figure 15 Waveform diagram of active power and reactive power on the rectifier side of the system

5 结语

该文在具有直流断路器特性的 MMC 改造思想基础上提出一种基于电阻耗能支路的 MMC 改造方案,并对方案的运行方式和附加支路参数设计进行了详细分析和仿真验证,得出结论:

1)所提改造方案将故障线路隔离时间可以控制在 5 ms 内、清除时间在 15 ms 内,且采用低成本的电力电子器件,具有良好的经济性和故障清除能力;

2)与同类型方案相比,所提方案采用耗能电阻进行故障短路电流衰减,参数设计容易,且改造结构集中在端口处,方便实际工程建设和维护管理;

3)所提故障判定方法有效利用转移开关 K_2 流过的电流来判定故障点是否消失,避免盲目的重合闸且判定方法简单有效;

4)所提故障线路重启策略充分利用耗能支路与 MMC 配合,故障线路恢复过程平稳,不会对系统造成较大冲击,提升了系统运行的可靠性。

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, 2016:280-281.
- [2] 蒋冠前,李志勇,杨慧霞,等. 柔性直流输电系统拓扑结构研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 145-153.
JIANG Guanjian, LI Zhiyong, YANG Huixia, et al. Research review on topological structure of flexible HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15):145-153.
- [3] 吴嘉玲, 卢铁兵. 柔性直流电网结构对单极接地故障过电压的影响[J]. 中国电力, 2021, 54(10):20-27.
WU Jialing, LU Tiebing. Influence of the VSC-HVDC system structure on the overvoltage of single-pole grounding fault[J]. Electric Power, 2021, 54(10):20-27.
- [4] 郭晓茜,崔翔,齐磊. 架空线双极 MMC-HVDC 系统直流短路故障分析和保护[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(8):2177-2185.
GUO Xiaoqian, CUI Xiang, QI Lei. DC short-circuit fault

analysis and protection for the overhead line bipolar mmc-hvdc system[J]. Proceeding of the CSEE, 2017, 37(8):2177-2185.

- [5] 蔡洁,夏向阳,李明德,等. 高压直流输电模块化多电平换流器拓扑研究[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(1):54-59.
CAI Jie, XIA Xiangyang, LI Mingde, et al. Study of MMC topologies in HVDC system[J]. Journ of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(1):54-59.
- [6] Song Q, Zeng R, Yu Z, et al. A modular multilevel converter integrated with DC circuit breaker[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(5):2502-2512.
- [7] 吴思源,柯飒,李婉卿,等. 基于故障仿真分析的高压直流断路器测试要求的确定方法[J]. 智慧电力, 2019, 47(4):53-58.
WU Siyuan, KE Sa, LI Wanqing, et al. Method to determine experimental requirements of HVDC circuit breaker based on fault simulation analysis[J]. Smart Power, 2019, 47(4):53-58.
- [8] 沙彦超,蔡巍,胡应宏,等. 混合式高压直流断路器研究现状综述[J]. 高压电器, 2019, 55(9):64-70.
SHA Yanchao, CAI Wei, HU Yinghong, et al. Review of research status of hybrid hvdc circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(9):64-70.
- [9] 何俊佳,袁召,赵文婷,等. 直流断路器技术发展综述[J]. 南方电网技术, 2015, 9(2):9-15.
HE Junjia, YUAN Zhao, ZHAO Wenting, et al. Review of DC circuit breaker technology development[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(2):9-15.
- [10] 魏晓光,周万迪,张升,等. 模块化混合式高压直流断路器研究与应用[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6):2038-2047.
WEI Xiaoguang, ZHOU Wandi, ZHANG Sheng, et al. Research and application of modular hybrid high voltage dc circuit breaker[J]. Proceeding of the CSEE, 2020, 40(6):2038-2047.
- [11] 方辉,宋勇辉,周敬森,等. 具有直流故障阻断能力的逆阻型混合子模块拓扑[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(18):82-89.
FANG Hui, SONG Yonghui, ZHOU Jingsen, et al. An improved RB-hybrid SM with DC fault blocking capability[J]. Power System Protection and Control, 2019,

- 47(18):82-89.
- [12] 邱欣,夏向阳,蔡洁,等.全桥型 MMC-HVDC 直流故障自清除控制保护策略研究[J].电力科学与技术学报,2018,33(4):88-94.
- QIU Xin, XIA Xiangyang, CAI Jie, et al. Full bridge-type MMC-HVDC with DC fault clearing protection strategies[J]. Journ of Electric Power Science and Technology,2018,33(4):88-94.
- [13] 李国庆,宋帧子,王国友.具有直流故障阻断能力的 MMC 不对称型全桥子模块拓扑[J].高电压技术,2019,45(1):12-20.
- LI Guoqing, SONG Zhenzi, WANG Guoyou. Asymmetric full bridge sub-module topology of mmc with dc fault blocking capability[J]. High Voltage Engineering,2019,45(1):12-20.
- [14] 宋强,杨文博,李笑倩,等.集成直流断路器功能的模块化多电平换流器[J].中国电机工程学报,2017,37(20):6004-6013.
- SONG Qiang, YANG Wengbo, LI Xiaoqian, et al. An MMC topology integrated with DC circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(20):6004-6013.
- [15] 俞永杰,邓伟成,李帅,等.采用双电流转移支路的直流电网故障清除策略[J].高电压技术,2021,47(5):1649-1658.
- YUYongjie, DENG Weicheng, LI Shuai, et al. Fault clearing strategy of DC power grid with double current transfer branches[J]. High Voltage Engineering,2021,47(5):1649-1658.
- [16] 王振浩,刘婕,肖壮,等.具备直流故障清除能力的电流转移型模块化多电平换流器[J].中国电机工程学报,2018,38(19):5795-5803+5936.
- WANG Zhenhao, LIU Jie, XIAO Zhuang, et al. A current-transferring MMC topology with DC fault clearance capability[J]. Proceeding of the CSEE,2018,38(19):5795-5803+5936.
- [17] 王振浩,赵家婧,成龙,等.具有直流故障清除能力的主动接地式模块化多电平换流器[J].电力系统自动化,2020,44(7):145-157.
- WANG Zhenhao, ZHAO Jiajing, CHENG Long, et al. Active-grounded modular multilevel converter with DC fault clearing capability[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(7):145-157.
- [18] 杨明发,谢志德. MMC-HVDC 混合旁路直流故障保护及重合闸控制策略[J].高电压技术,2019,45(2):564-570.
- YANG Mingfa, XIE Zhide. DC fault protection based on hybrid bypass and system recovery starategy in MMC-HVDC[J]. High Voltage Engineering,2019,45(2):564-570.
- [19] 蔡静,董新洲.高压直流输电线路故障清除及恢复策略研究综述[J].电力系统自动化,2019,43(11):181-190.
- CAIJing, DONG Xinzhou. Overview on research of faulting clearing and recovery starategy for hvdc transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(11):181-190.