

## 含直流断路器的 $\pm 10$ kV 环网型柔性直流配电网故障暂态特性研究

刘书瀚<sup>1</sup>, 庄园<sup>2</sup>, 李晨颀<sup>3</sup>, 汪毅峰<sup>3</sup>, 李江涛<sup>3</sup>

(1. 国网江苏省电力有限公司徐州供电分公司, 江苏 徐州 221005; 2. 江苏徐电建设集团有限公司, 江苏 徐州 221005;  
3. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049)

**摘要:** 柔性直流配电网因其电能质量、供电效率以及运行成本等方面的突出优势备受青睐。作为一种新型的配电系统,柔直配电的故障暂态特性亟需进一步的研究和完善,直流断路器的加入也导致了系统故障暂态特性发生了根本变化。针对含直流断路器的环网型柔直配电网故障暂态特性研究,首先,构建了 $\pm 10$  kV 环网型柔直配电网的电磁暂态仿真模型,基于有无直流断路器设计了两种系统保护动作方案;其次,将柔性直流配电系统分为4个故障区,选取需要重点研究的典型故障工况,确定电压监测点位置;最后,针对换流阀区域故障和直流线路故障,仿真分析了其无保护时的固有故障暂态特性以及有无直流断路器两种保护动作方案下的操作过电压暂态特征,并对其技术优势和应用前景进行比较。文中的研究对环网型柔性直流配电网的绝缘配合方案设计有较大意义。

**关键词:** 柔性直流配电网; 直流断路器; 故障暂态特性; PSCAD/EMTDC

### Research on Fault Transient Characteristics of $\pm 10$ kV Ring-type VSC-DC Distribution Network with DC Circuit Breakers

LIU Shuhan<sup>1</sup>, ZHUANG Yuan<sup>2</sup>, LI Chenjie<sup>3</sup>, WANG Yifeng<sup>3</sup>, LI Jiangtao<sup>3</sup>

(1. State Grid Xuzhou Power Supply Company, Jiangsu Xuzhou 221005, China; 2. Jiangsu Xudian Construction Group Co., Ltd., Jiangsu Xuzhou 221005, China; 3. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** VSC-DC distribution networks are highly favored due to their outstanding advantages in power quality, power supply efficiency and operating costs. As a new type of power distribution system, the fault transient characteristics of the VSC-DC distribution require further research and improvement, and the integration of DC circuit breakers has also led to fundamental changes in the fault transient characteristics of the system. For the research on the fault transient characteristics of the ring-type VSC-DC distribution network with DC circuit breakers, first, an electromagnetic transient simulation model of a  $\pm 10$  kV ring-type VSC-DC distribution network is constructed. Two system protection action schemes are designed based on the presence or absence of DC circuit breakers. Then, the VSC-DC distribution system is divided into four fault zones. Typical fault conditions that require focused study are selected, and the locations of voltage monitoring points are determined. Finally, for the faults in converter valve area and the DC line, the inherent fault transient characteristics without protection and the operating overvoltage transient characteristics under two protection action schemes with and without DC circuit breakers are analyzed, and its technical advantages and application prospects are compared. The research in this paper is of great significance to the design of insulation coordination scheme of the ring-type VSC-DC distribution network.

**Key words:** VSC-DC distribution network; DC circuit breaker; fault transient characteristics; PSCAD/EMTDC

收稿日期:2025-10-11; 修回日期:2026-01-07

基金项目:国家重点研发计划研究项目(2017YFB0902700, 2017YFB0902701)。

Project Supported by National Key Research and Development Program of China(2017YFB0902700, 2017YFB0902701).

## 0 引言

近年来,系统中直流负荷的比重逐渐加大,分布式发电、储能装置<sup>[1-4]</sup>与电动汽车加速推广,重要敏感负荷对电能质量和可靠性的要求不断提高,传统的交流配电架构已无法满足新形势的要求<sup>[5]</sup>。由于电力电子技术的飞速发展,直流电压等级的变换已不再是技术壁垒,将柔性直流技术应用于配电领域是历史的必然。未来配电网形态将会是多种电压等级、多种电流形式并存的多层级、环网状、交直流共存、互联接口统一、继电保护完善、可实现便捷自组网的新型构架,这也是中国能源互联网建设的基本支撑,对中国经济技术发展有重要意义<sup>[6-7]</sup>。

中压直流断路器可以选择性切除故障线路,对直流配网的可靠运行有较大意义。目前,中压直流断路器的研究延续了高压领域的成果,其拓扑结构同样可以分为机械式、全固态以及混合式3种<sup>[8]</sup>。中压直流断路器的拓扑结构形式各异,其开断时长已经基本满足柔直系统的速动性要求,为了适应在未来柔直配网中大规模的使用,新型拓扑的设计、断路器样机研制以及制造成本的降低是未来研究的关键问题<sup>[9-16]</sup>。

目前已有一些文献对柔直配电系统故障暂态特性与绝缘配合展开了研究。华南理工大学何秋萍对深圳宝龙工业城 $\pm 10$  kV双电源手拉手型柔直配网的过电压与绝缘配合展开了研究,根据实际工程的相关参数搭建了仿真模型,对交直流系统的相互影响进行深入探讨,确定了联接变压器接地电阻的选择依据,并最终通过故障下的过电压仿真分析给出了绝缘配合结果<sup>[17]</sup>。浙江大学苏宜靖同样将两端 $\pm 10$  kV伪双极直流配电系统作为研究对象,详细介绍了柔直配网参数计算和仿真建模的过程,将系统分为4个故障区并展开过电压仿真分析<sup>[18]</sup>。华南理工大学肖芳磊以珠海唐家湾三端柔直配网工程为研究对象,针对几种典型故障工况展开过电压与绝缘配合的研究,并对架空线配电进行雷电过电压的仿真分析,得到了珠海唐家湾三端柔性直流配电网工程的雷电过电压分布特征和雷电冲击绝缘水平<sup>[19]</sup>。现存文献对环网型结构柔直配网操作过电压的研究不足,且大多是基于无直流断路器的保护动作方案。此外,在包含直流断路器的柔直系统操作过电压仿真研究中,已有的研究采用闭锁换流阀早于断路器动作的保护方式,局限于高压柔性直流输电的相关措施,未考虑到通过直流断路器切除故障线路,换流阀正常投切且直流配电网开环运行的情

况,故而需要对环网型柔直配网的过电压和绝缘配合展开进一步研究<sup>[20-24]</sup>。

文中基于PSCAD/EMTDC搭建了包含模块化多电平换流器、直流电压变换器、光伏发电、储能、交直流负荷在内的 $\pm 10$  kV环网型交直流混联配电系统仿真模型,对其控制方式以及相关参数进行了详细设计,提出了有无直流断路器的两种保护方案。对柔直配网在多种典型故障工况下的固有暂态电压特性及故障对系统的影响展开了研究,比较了两种保护方案对隔离换流阀区域故障和直流线路故障时的操作过电压情况,对环网型柔性直流配电网过电压与绝缘配合的研究有着重要意义。

## 1 环网型柔性直流配电网参数设计

柔直配电系统拓扑可以分为放射型、手拉手型以及环网型3种形式。由于环网型拓扑具有比放射型和手拉手型拓扑更高的可靠性,且功率传输方式更加灵活多样,因此文中针对环网型柔性直流配电网展开研究<sup>[25]</sup>。

柔直配电系统由换流站、电压变换器、电力电缆、分布式能源及交直流负载组成。因模块化多电平换流器具有谐波水平低、电磁干扰轻微、便于模块化生产等优点,故采用模块化多电平换流器进行系统中换流站的构建。为了具备较优的经济效益和运行可靠程度,换流站全部采用伪双极接线方式<sup>[26-28]</sup>。

文中设计的 $\pm 10$  kV环网型柔性直流配电网拓扑结构见图1。柔直配网共包含3座MMC,其内部联接变压器采用Dy11接线,阀侧为Y形连接且中性点经 $2\ 500\ \Omega$ 电阻接地。MMC<sub>1</sub>与MMC<sub>2</sub>与110 kV交流系统连接,MMC<sub>3</sub>与中低压交流负载连接,直流固态变压器与光伏发电、蓄电池储能以及750/400 V低压直流负载连接。各站通过地下电缆组成了环网型 $\pm 10$  kV柔直配电系统,并且每条直流线路出口处均配置了平波电抗器。

柔直配电系统采用主从控制策略,MMC<sub>1</sub>为主控站,其额定容量为20 MVA,控制柔直配网直流电压稳定于 $\pm 10$  kV,并实现有功功率的动态平衡。MMC<sub>2</sub>与110 kV交流系统连接,控制交流系统向柔直配网输出有功功率10 MW。MMC<sub>3</sub>与无源交流负载连接,其潮流方向确定,因此采用定频率、定交流电压的孤岛控制,使得换流阀交流侧电压有效值稳定在10 kV,频率稳定在50 Hz。换流站的具体参数见表1。DAB-ISOP采用单移相控制,控制无源低压直流系统从直流电网吸收有功功率5.5 MW。直流电缆Cable<sub>1</sub>、Cable<sub>4</sub>长度分别为50、15、30、10 km。

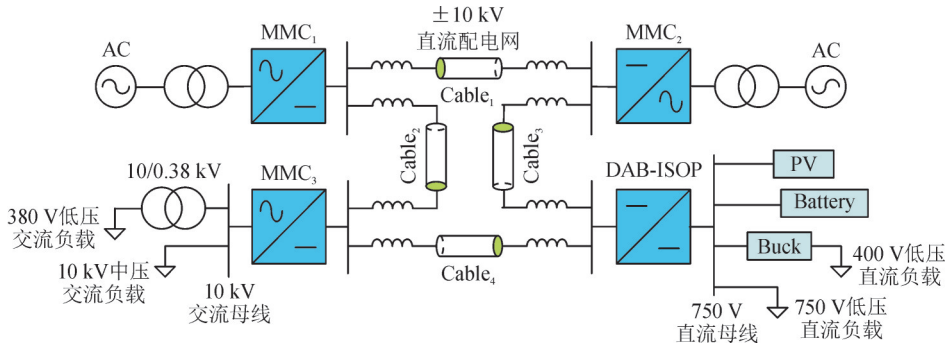


图1 ±10 kV 环网型柔直配电系统拓扑结构

Fig. 1 ±10 kV ring-type VSC-DC distribution system topology

表1 ±10 kV 环网型柔直配电系统换流站参数

Table 1 ±10 kV ring-type VSC-DC distribution system converter station parameters

参数	数值		
换流站	MMC <sub>1</sub>	MMC <sub>2</sub>	MMC <sub>3</sub>
控制策略	$U_d/Q$	$P/Q$	Island
控制目标	$U_d=20$ kV	$P=10$ MW	$U_{ac(rms)}=10$ kV
	$Q=0$ Mvar	$Q=0$ Mvar	$f=50$ Hz
额定容量/MVA	20	10	10
子模块数/个	20	20	20
子模块电容/ $\mu$ F	13 330	6 670	6 670
桥臂电抗/mH	3.8	7.6	7.6
平波电抗器/mH	20	20	20
联接变压器容量/ MVA	24	12	12
	联接变压器额定 电压/kV	10.5/10.5	10.5/10.5

无论采用何种直流断路器拓扑结构,在进行分断时均是通过金属氧化物避雷器吸收能量,对系统操作过电压的影响机理相同。当下中压直流断路器大多利用串联电容建立反向电压从而完成换流过程,当转移支路电容及金属氧化物避雷器参数相同时,其分断过程中的暂态电压和暂态电流特性完全一致。因此在进行故障暂态特性的研究时,采用何种中压直流断路器拓扑对过电压与绝缘配合的研究没有影响。

文中采用了ABB提出的IGBT串联型混合式中压直流断路器,见图2。断路器正常工作时,电流经主导通支路流通,导通损耗较低。若直流线路侧出现短路故障,短路电流迅速增大,此时触发转移支路的负载转移开关导通、主导通支路的负载转移开关闭锁,使得电流流通至转移支路。当快速机械开关达到分断要求时,操作快速机械开关分闸并触发转移支路负载转移开关闭锁,转移支路电容将开始充电。避雷器两端电压升高至一定数值后,能量经耗能支路吸收耗散,直至短路电流降为零。文中取

负载转移开关中电容值为 $110 \mu\text{F}$ ,电阻值为 $2.5 \Omega$ ,避雷器型号采用HY5WS-7.6/30,直流参考电压15 kV,断路器开断时长约为3 ms。

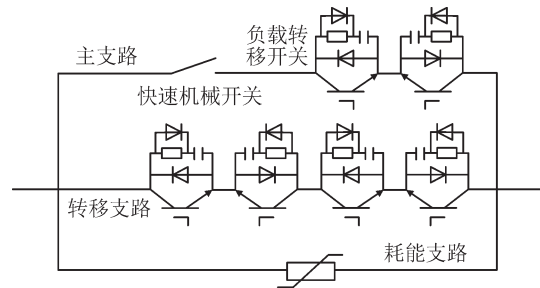


图2 IGBT串联混合式中压直流断路器拓扑结构

Fig. 2 IGBT series hybrid MVDC circuit breaker topology

## 2 系统典型故障选取及保护动作方案设计

### 2.1 典型故障及电压监测点

柔直配电网的故障区域可以划分为交流系统、换流阀内部、直流线路以及交直流负荷四个区域,见图3。为了研究直流断路器的有无对故障暂态特性的影响,文中仅针对换流阀区域故障和直流线路区域故障展开分析,即联接变阀侧单相接地故障、联接变阀侧两相接地故障、联接变阀侧两相短路故障、联接变阀侧三相接地故障、换流阀短路故障、阀顶接地故障、单极接地故障以及双极短路故障。

为了研究柔直配电网的故障暂态电压特性,需要合理地选取电压监测点位置。交流系统与交直流负荷仅对中低压母线的电压进行测量即可,对于换流阀内部则选取了6个需要重点监测过电压水平的电压监测点,分别对应联接变压器中性点、联接变压器阀侧、桥臂电抗器两端、换流阀端间、阀顶以及平波电抗器端间,见图4。

### 2.2 系统保护动作方案

基于柔直配电网中是否配置直流断路器,文中提出了两种不同的系统保护动作方案。对于交流系统区域或负荷区域故障,两种保护动作方案均

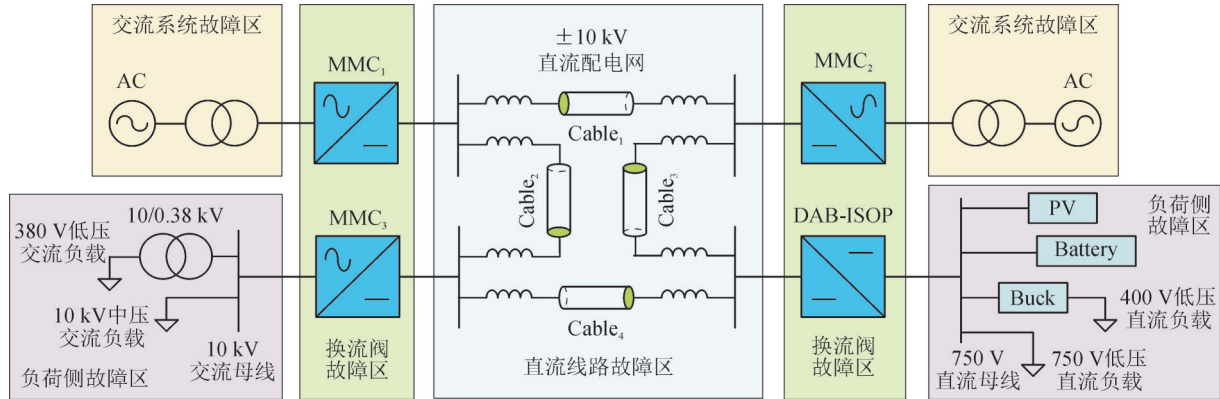


图3 ±10 kV环网型柔直配电网故障分区

Fig. 3 Fault division of ±10 kV ring-type VSC-DC distribution system

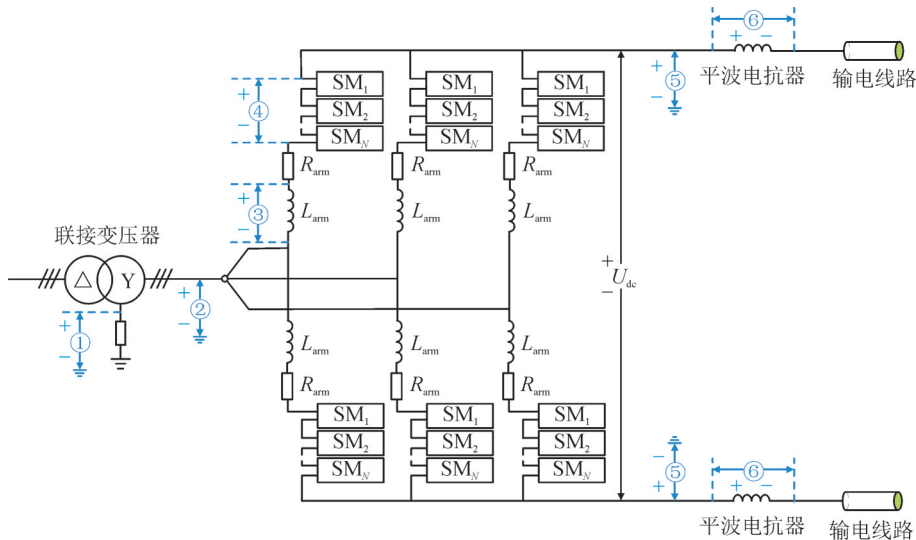


图4 电压监测点位置

Fig. 4 Voltage monitoring point location

采用了欠压保护,MMC交流系统侧三相电压最大值小于0.5 p.u.时换流站闭锁,DAB-ISOP低压侧极间电压小于0.5 p.u.时IGBT闭锁。对于换流阀区域和直流线路区域故障,无直流断路器时的保护动作方案见表2。

表2 无直流断路器时的保护动作方案

Table 2 Protection scheme without DC circuit breaker

故障区	故障类型	交流断路器	换流阀
换流阀	所有故障	单台动作(40 ms)	单站闭锁(3 ms)
	单极接地	不动作	不动作
直流线路	双极短路	全部动作(40 ms)	全站闭锁(3 ms)
	断线	全部动作(40 ms)	全站闭锁(3 ms)

无直流断路器的保护动作方案针对换流阀以及直流线路区域故障采用故障后3 ms换流阀闭锁,故障后40 ms跳开闭锁站交流侧断路器的保护方式。区别在于发生直流线路故障时系统中所有换流站保护均动作,换流阀内部故障时仅故障站保护动作。配置直流断路器时的保护动作方案见表3。

表3 配置直流断路器时的保护动作方案

Table 3 Protection scheme with DC circuit breaker configured

故障区	故障类型	交流断路器	直流断路器	换流阀
换流阀	所有故障	单台动作(40 ms)	2台动作(3 ms)	单站闭锁(10 ms)
	单极接地	不动作	不动作	不动作
直流线路	双极短路	不动作	4台动作(3 ms)	不动作
	断线	不动作	4台动作(3 ms)	不动作

为了提高柔性直流配电系统的运行可靠性,通常要求直流配电网可以像交流配电网一样,发生单极接地故障时可以持续运行一段时间,故直流线路发生单极接地故障可以不采取保护措施。若配置直流断路器,在某一条线路出现双极短路故障以及断线故障时,其两端对应的4台直流断路器将在故

障 3 ms 后操作分断。当某一换流阀内部区域出现故障后,在故障 3 ms 后操作换流阀出线的 2 台直流断路器分断,但此时依旧无法实现故障隔离,因此采取了故障 10 ms 后闭锁故障所在换流阀,故障 40 ms 后分断交流侧断路器的措施。

### 3 换流阀区域故障暂态电压特性分析

#### 3.1 无保护时的固有暂态电压特性

换流阀内部故障在无保护时的固有暂态电压特征对柔直配电网系统的故障识别有较大意义。由于发生不同类型故障时各监测点的电压波形差异很大,故只给出部分特征明显的监测点电压。假设故障均发生在 MMC<sub>1</sub> 内部,故障持续时长 50 ms,过渡电阻 0.01 Ω,电压波形为无保护时的自然响应。

发生联接变压器阀侧 A 相接地故障时,部分监测点的电压见图 5。故障期间桥臂电抗器两端、阀两端以及平波电抗器端间电压未受到任何影响,联接变压器阀侧 A 相电压下降为零,BC 两相电压上升为线电压,中性点电压为正常运行时 A 相电压的负值,阀顶直流正负极电压出现工频振荡,但极间直流电压没有变化。故障清除后,阀顶直流电压、联接变压器中性点电压以及联接变压器阀侧三相电压均存在一段时间较长的恢复过程。

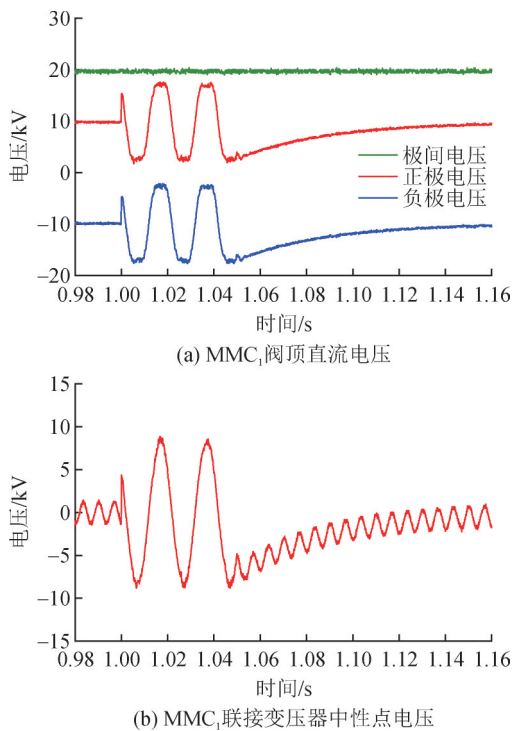


图 5 联接变压器阀侧 A 相接地故障时部分监测点电压  
Fig. 5 Voltage of some monitoring points when A-phase grounding fault on the valve side of transformer occur

故障清除后阀顶直流电压的恢复速度与联接

变压器中性点接地电阻的大小密切相关。不同中性点电阻时 MMC<sub>1</sub> 阀顶的正极直流电压曲线见图 6,可以发现,中性点接地电阻越小,故障恢复速度越快,但中性点接地电阻过小会导致系统稳态直流电压的明显波动,且谐波以二倍频分量为主。

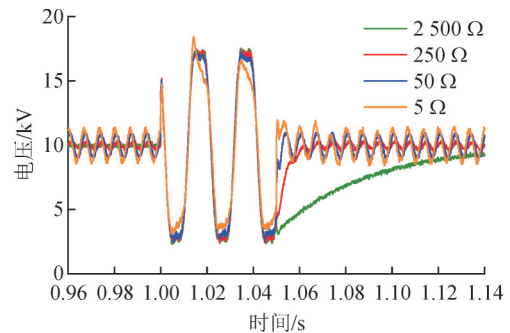


图 6 单相接地故障时不同中性点接地电阻对直流电压的影响

Fig. 6 Effects of different neutral grounding resistances on DC voltage during single-phase grounding fault

联接变压器阀侧 AB 两相接地时部分监测点的电压波形见图 7。研究发现,联接变压器阀侧 AB 两相接地故障期间,MMC<sub>1</sub> 阀顶阀顶直流电压以及极间电压均出现了二倍频分量为主的波动。A、B 相阀两端出现幅值极高的过电压,且最大过电压幅值均出现在下桥臂,上下桥臂阀两端电压波形类似尖顶脉冲。

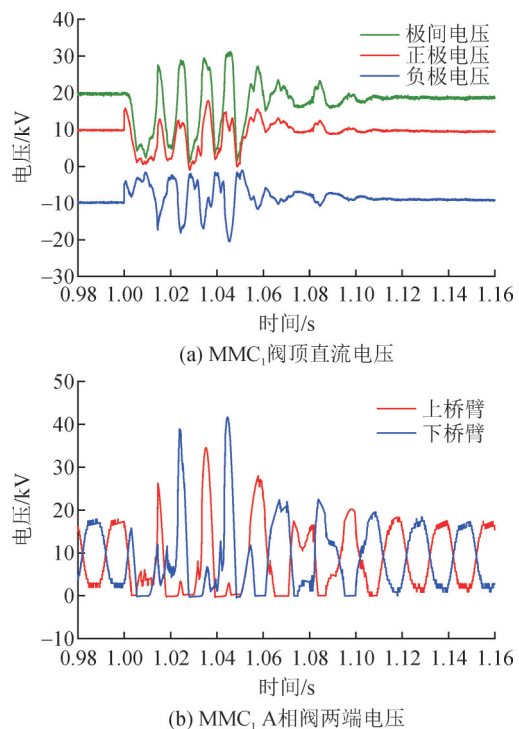


图 7 联接变压器阀侧 AB 两相接地故障时部分监测点电压  
Fig. 7 Voltage of some monitoring points when AB phase grounding fault on the valve side of transformer occur

联接变压器阀侧两相短路时,阀顶直流电压依

然存在二倍频分量为主的波动,但波形略微平缓。

联接变压器阀侧三相接地时部分监测点的电压见图8。故障期间联接变压器阀侧三相电压与中性点电压相等,波形类似于三角波。阀顶直流电压不再有明显谐波特征,故障期间阀顶直流电压以及极间电压下降至稳态值的一半,并不断振荡。

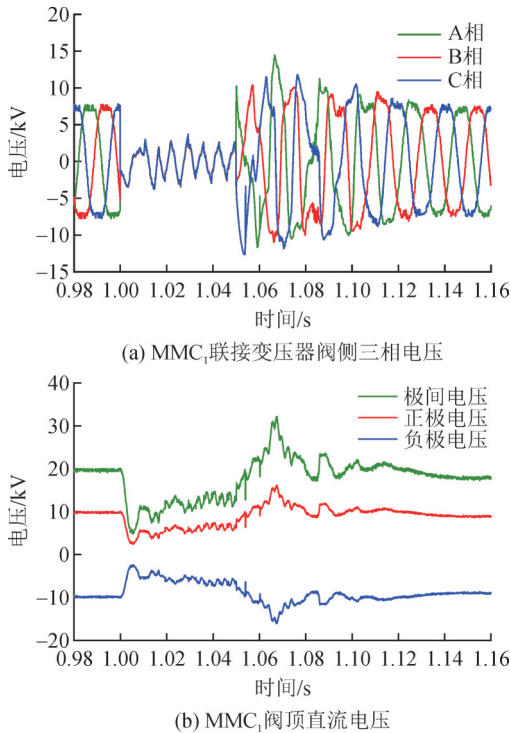


图8 联接变压器阀侧三相接地故障时部分监测点电压  
Fig. 8 Voltage of some monitoring points when three phase grounding fault on the valve side of transformer occur

由于阀厅内环境优良,阀短路故障的发生概率极低,一般不作为外绝缘设计的工况,但阀短路故障对换流站的影响十分严重。

当A相上桥臂阀短路故障时,系统部分监测点的电压见图9。由图9可以发现,阀短路故障时阀顶正负极电压以及极间电压略有下降,且存在以工频为主的尖顶波,联接变压器中性点电压出现直流偏移,最大峰值可达到9.2 kV。故障期间,A相上桥臂两端电压下降为零,下桥臂两端电压在10 kV附近波动,并存在工频尖顶脉冲。上桥臂阀底对地电压在7.5 kV附近波动,下桥臂阀底对地电压的变化规律与下桥臂阀两端电压类似,电压数值相差大约10 kV。

正极阀顶接地故障时部分监测点的电压见图10。阀顶接地故障、直流母线单极接地故障以及直流线路单极接地故障的故障特性类似,故障点的距离不同使得故障瞬间的暂态过电压峰值有一定差异。由故障期间,故障极的直流电压下降为零,健全极的直流电压幅值升高为20 kV,极间直流电压

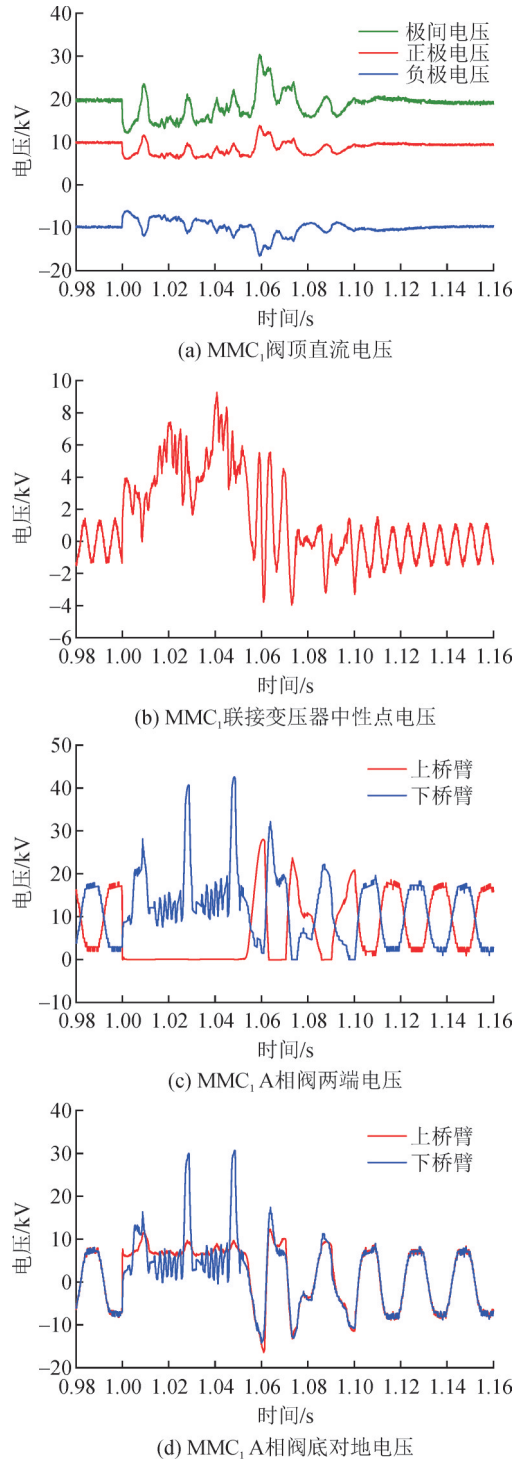


图9 MMC<sub>1</sub> A相上桥臂阀短路时部分监测点电压  
Fig. 9 Voltage of some monitoring points when upper arm valve of phase A in MMC<sub>1</sub> is short-circuited

没有变化。MMC出口直流电流、桥臂电抗器端间电压以及阀端间电压与稳态时完全相同,联接变压器阀侧三相对地电压、中性点对地电压以及上下桥臂阀底对地电压均出现-10 kV的直流偏移。

与联接变压器阀侧单相接地故障类似,阀顶接地故障清除后出现直流偏移的电压监测点存在较长时间的电压恢复过程,恢复时间与联接变压器中

性点接地电阻的大小密切相关, 见图 11。

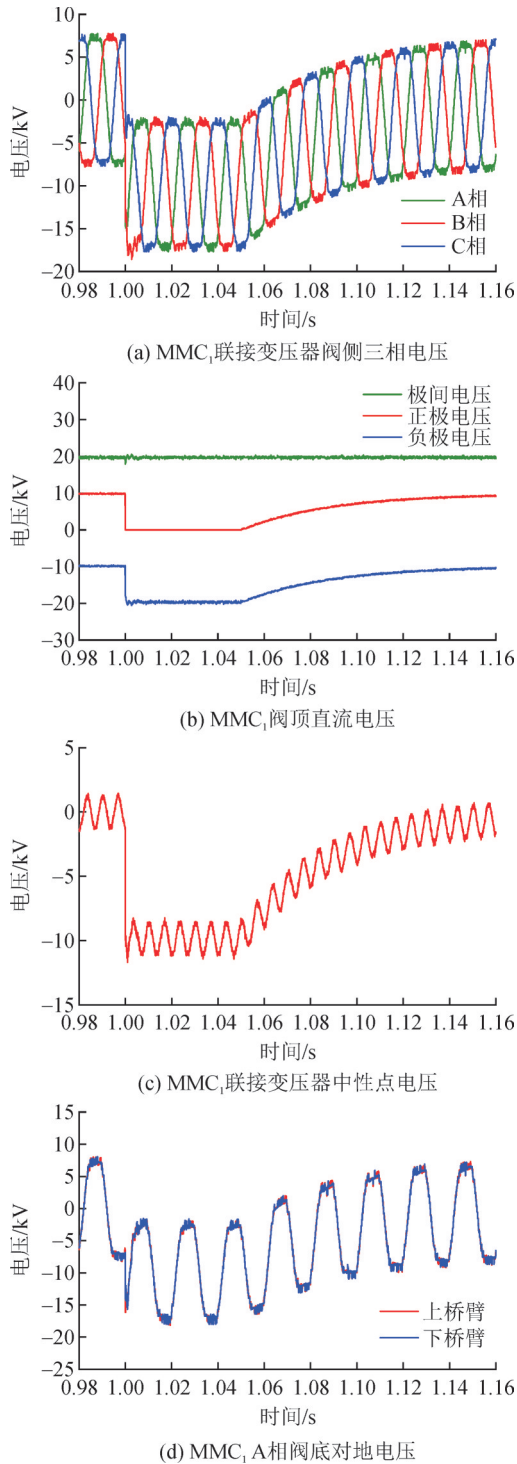


图 10 MMC<sub>1</sub> 正极阀顶故障时部分监测点的电压  
Fig. 10 Voltage of some monitoring points when MMC<sub>1</sub> positive valve's top grounding fault occur

换流阀区域故障对整个柔性直流配电系统影响深远, 是柔性直流配电网过电压与绝缘配合需重点考虑的对象。根据上述分析, 可得换流阀区域故障时的无保护固有暂态电压特性见表 4。

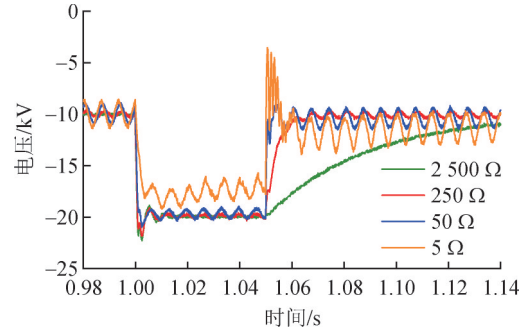


图 11 正极阀顶接地故障时不同中性点接地电阻对直流电压的影响

Fig. 11 Effects of different neutral grounding resistances on DC voltage during positive valve's top grounding fault

表 4 换流阀区域故障无保护时的固有暂态电压特性  
Table 4 Inherent transient voltage characteristics of converter valve fault without protection

故障工况	暂态电压特性
阀侧单相接地	阀顶直流电压出现工频振荡, 联接变压器中性点电压有效值上升为相电压有效值, 故障恢复速度与联接变压器中性点接地电阻有关
阀侧两相接地/两相短路故障	阀顶直流电压及极间电压出现了二倍频波动, 换流阀两端电压产生工频尖顶脉冲
阀侧三相接地	直流电压无明显谐波特征, 故障期间阀顶直流电压以及极间电压下降至稳态值的一半, 并不断振荡
换流阀短路	正负极电压以及极间电压略有下降, 存在以工频为主的尖顶波, 联接变压器中性点电压出现直流偏移
阀顶单极接地	联接变压器阀侧电压、阀顶直流电压及联接变压器中性点电压均出现 10 kV 直流偏移, 故障恢复速度与联接变压器中性点接地电阻有关

### 3.2 两种保护动作方案下操作过电压暂态特性

由于保护动作方案针对不同的故障类型均采取了相同的动作逻辑, 故仅选取具有代表性的联接变压器阀侧三相接地故障与阀顶接地故障展开研究。MMC<sub>1</sub> 联接变压器阀侧发生三相接地故障时, 两种保护方案下部分监测点的电压见图 12。

由图 12 可知,  $t=1.003$  s 时直流断路器动作或换流阀闭锁都会使得出线对地电压发生短时振荡, 振荡频率约为 200 Hz。相比之下, 直流断路器动作引起的电压振荡更加明显, 产生了幅值较高的操作过电压, 对平波电抗器的绝缘配合产生较大影响。各换流站阀顶对地电压未因直流断路器动作或换流阀闭锁产生明显的操作过电压。MMC<sub>1</sub> 阀顶正极接地故障时, 两种保护方案下部分监测点的电压见图 13。

阀顶接地故障时, 阀顶故障极电压为零, 非故障极电压上升为原先的二倍。采用保护方案一时, 非故障极电压在换流阀闭锁后逐渐衰减, 波形仅有

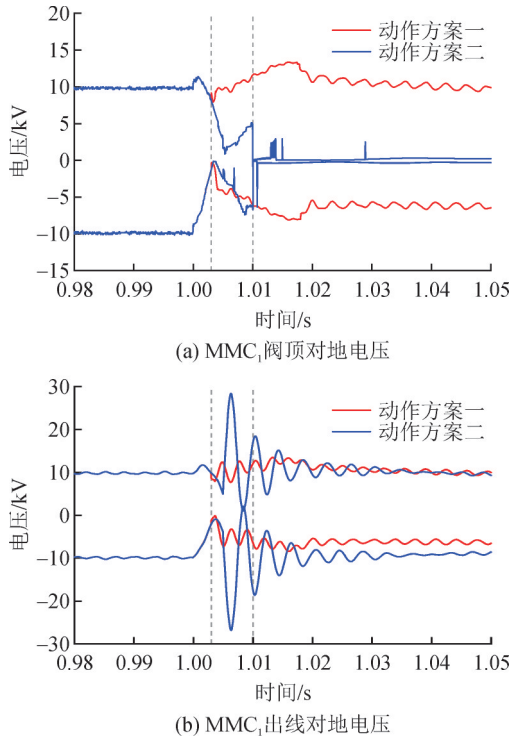


图12 MMC<sub>1</sub>联接变压器阀侧三相接地故障时两种保护方案下部分监测点电压

Fig. 12 Voltage of some monitoring points under the two protection schemes when three-phase grounding fault on the valve side of the transformer in MMC<sub>1</sub> occur

两个明显波峰,未出现明显振荡;采用保护方案二时,非故障极电压在直流断路器动作后维持二倍稳态电压不变,在换流阀闭锁后以300 Hz的频率在-12.5 kV左右不断振荡,交流断路器动作后非故障极电压逐渐降低。由图13(b)可以发现,直流断路器动作使得联接变压器中性点操作过电压幅值略有升高。MMC<sub>1</sub>出线对地电压同样因直流断路器的动作产生高频振荡,此时振荡频率约为500 Hz,出线对地电压的振荡幅值最高可达31.3 kV。

直流断路器的动作会对柔直配电系统故障时的操作过电压产生影响,对于换流站出线上的平波电抗器两端对地电压以及平波电抗器端间电压的影响尤其明显,直流断路器动作后会出现高频振荡并产生幅值较高的操作过电压。相比之下闭锁换流站的保护动作方案更优。

#### 4 直流线路区域故障暂态电压特性分析

##### 4.1 无保护时的固有暂态电压特性

单极接地故障的故障暂态电压特性与阀顶接地故障类似,只是故障点与换流站距离远近的不同会对电压幅值产生一定影响,故不再单独分析。双极短路故障对柔直配网的影响极大,其故障暂态特

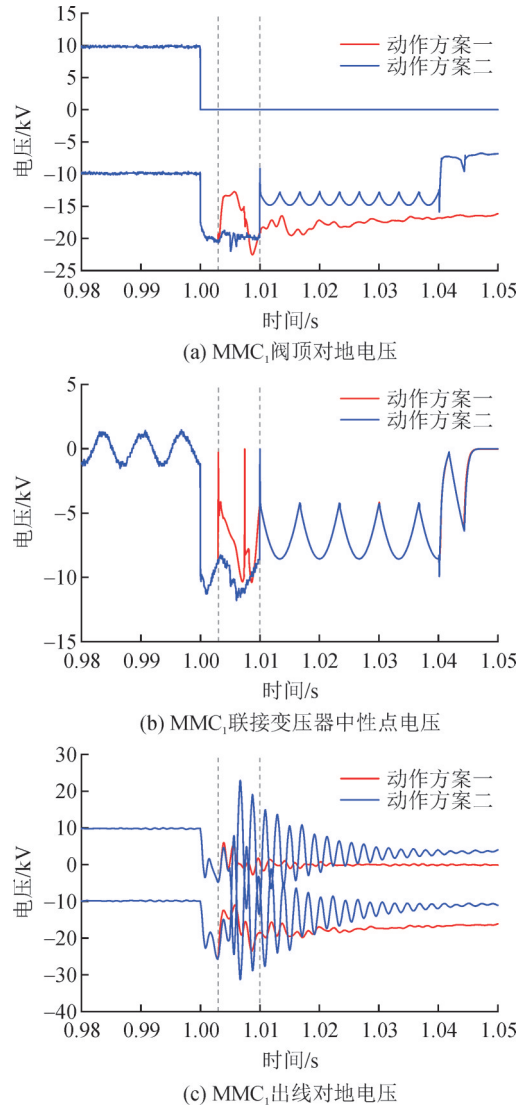


图13 MMC<sub>1</sub>阀顶正极接地时两种保护方案下部分监测点电压

Fig. 13 Voltage of some monitoring points under the two protection schemes when MMC<sub>1</sub> positive valve's top grounding fault occur

性已有较多文献进行论述,通常直流电压会迅速下降,短路电流会迅速升高,换流阀的相关保护会动作。假设直流线路故障均发生在Cable<sub>1</sub>上MMC<sub>1</sub>出口处,故障持续时长50 ms,过渡电阻0.01 Ω。此时各换流站阀顶对地电压迅速下降,且距离故障点越近的换流站阀顶电压下降得越快,此时MMC<sub>1</sub>阀顶对地电压见图14。

当正极断线故障发生在Cable<sub>1</sub>上MMC<sub>1</sub>出口处时,除了换流站阀顶对地电压及联接变压器中性点电压变化较为明显,其他监测点电压变化幅度均很小。MMC<sub>1</sub>阀顶直流电压及MMC<sub>1</sub>联接变压器中性点电压见图15。

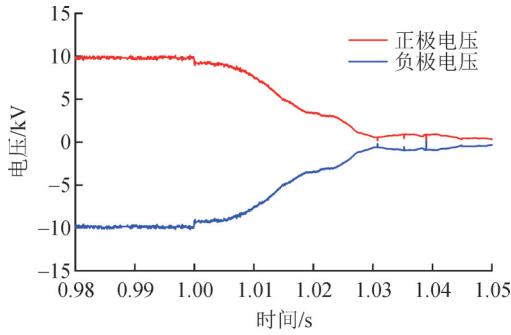
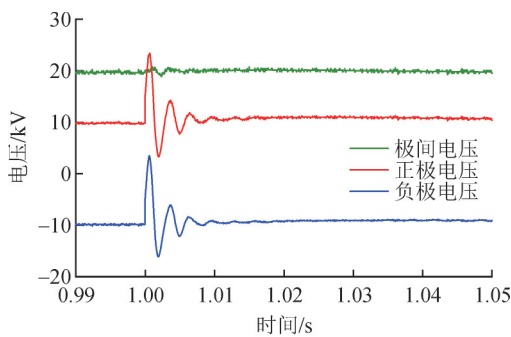
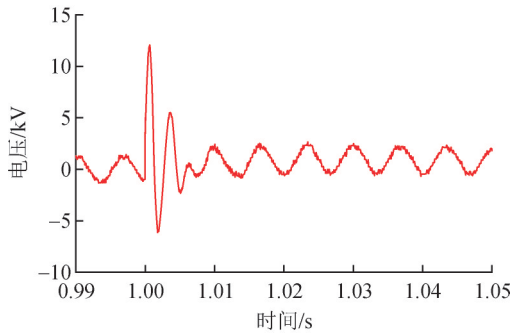


图 14 Cable<sub>1</sub>上近 MMC<sub>1</sub> 一侧发生双极短路时 MMC<sub>1</sub> 阀顶对地电压

Fig. 14 Voltage of MMC<sub>1</sub> valve's top when bipolar short circuit occurs on Cable<sub>1</sub> near MMC<sub>1</sub>



(a) MMC<sub>1</sub> 阀顶直流电压



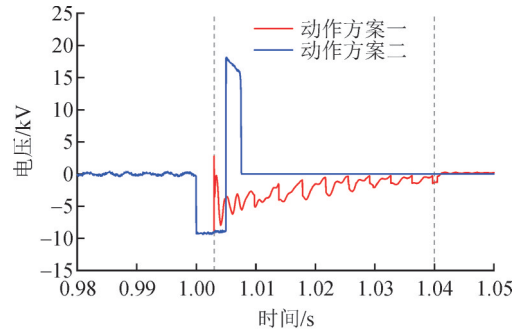
(b) MMC<sub>1</sub> 联接变压器中性点电压

图 15 Cable<sub>1</sub>上近 MMC<sub>1</sub> 一侧正极断线时部分监测点电压  
Fig. 15 Voltage of some monitoring points when positive pole disconnection fault occurs on Cable<sub>1</sub> near MMC<sub>1</sub>

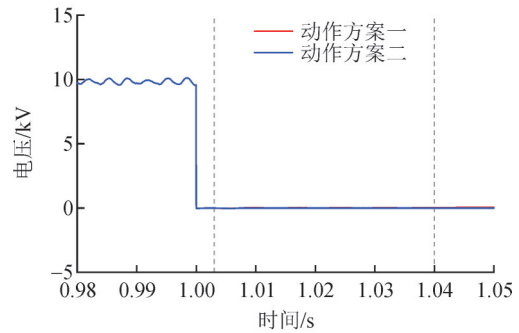
由图 15 可知, 断线故障发生后 10 ms 内, 所有换流站阀顶均出现幅值较高的过电压, 第一个波峰的振荡方向与初始功率方向有关, 正负极电压波形相同。与阀顶接地、线路单极接地故障时电压长时间存在直流偏移不同, 断线故障时的过电压持续时间很短。故障进入稳态后, Cable<sub>1</sub> 上不再有功率传输, 直流配电网变为开环运行。

#### 4.2 两种保护动作方案下操作过电压暂态特性

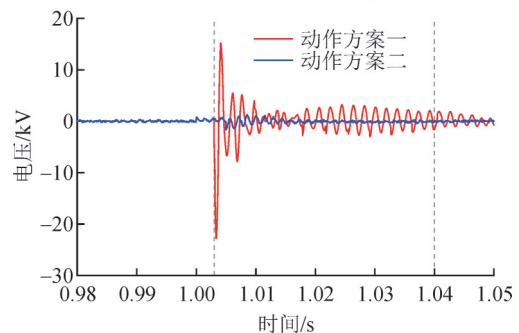
假定双极短路故障发生在 Cable<sub>1</sub> 上 MMC<sub>1</sub> 出口处, MMC<sub>1</sub> 两条出线上的平波电抗器端间电压及出线对地电压见图 16, 正负极电压波形幅值相同、极性相反, 故只给出正极电压波形。



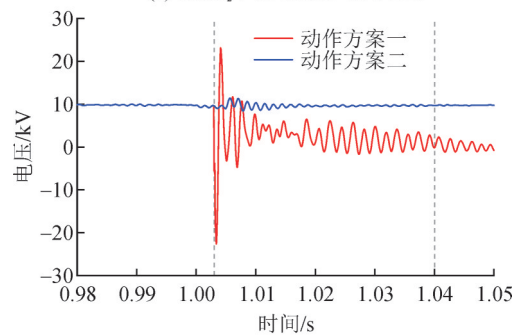
(a) Cable<sub>1</sub> 平波电抗器端间电压



(b) Cable<sub>1</sub> 出线对地电压



(c) Cable<sub>2</sub> 平波电抗器端间电压



(d) Cable<sub>2</sub> 出线对地电压

图 16 Cable<sub>1</sub> 近 MMC<sub>1</sub> 一侧双极短路时部分监测点电压  
Fig. 16 Voltage of some monitoring points when bipolar short circuit occurs on Cable<sub>1</sub> near MMC<sub>1</sub>

故障线路两端平波电抗器的端间电压在直流断路器动作期间短暂抬升, 操作过电压幅值未超过 20 kV。直流断路器切除故障线路不会对另一条出线上平波电抗器端间电压及出线电压产生明显影响, 系统其他位置不会出现操作过电压, 仍可以保持正常的功率传输。相反, 换流阀动作使得另一条出线上平波电抗器端间电压及出线电压发生明显

振荡过程,并产生了幅值较高的操作过电压。可见直流断路器的加入仅会使故障线路平波电抗器端电压暂态特性发生改变,对系统故障后的恢复过程起到了良好作用。

假定正极断线故障发生在 Cable<sub>1</sub>上 MMC<sub>1</sub>出口处,MMC<sub>1</sub>两条出线上的平波电抗器阀侧对地电压及出线对地电压见图 17。

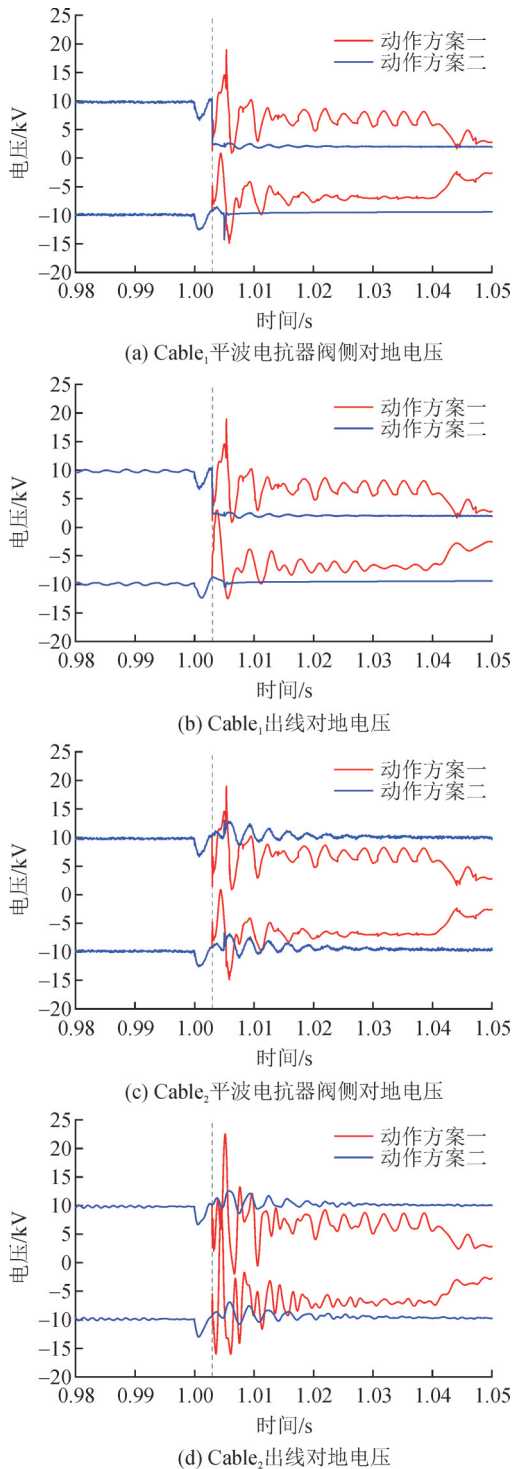


图 17 Cable<sub>1</sub>近 MMC<sub>1</sub>一侧正极断线时部分监测点电压  
Fig. 17 Voltage of some monitoring points when positive pole disconnection fault occurs on Cable<sub>1</sub> near MMC<sub>1</sub>

发生断线后全站闭锁会使平波电抗器两端出现明显的操作过电压,直流断路器切除故障线路时的电压波动很小,系统可以较快恢复稳态运行。若直流断路器延迟动作还可以实现故障线路的零电流分断,对直流配电网电压的影响会更小。

直流断路器的动作不会使系统中各关键位置在切除双极短路故障线路、断线故障线路时产生明显的操作过电压,故障线路切除后系统可以快速恢复运行,相比闭锁换流阀的保护动作方案有着更高的可靠性和技术优势,对于改善柔直配电网操作过电压及绝缘配合设计有着重大意义。

## 5 结论

文中构建了 $\pm 10$  kV环网型柔直配电网系统仿真模型,给出了有无直流断路器时的两种保护动作方案,选取了多种对柔直配电网有深刻影响的故障类型,对两种保护方案下的暂态电压特性进行了仿真研究,得到了以下结论:

1)换流阀区域故障时,不同故障下系统各监测点的固有暂态电压特性具有明显差异。直流断路器动作对操作过电压的暂态特性有一定影响,导致平波电抗器两端对地电压出现明显振荡过程,操作过电压水平有所提高。

2)直流线路故障且无保护动作时,双极短路故障会使得系统各位置直流电压快速下降,断线故障会使得各换流站阀顶对地电压出现短暂振荡过程。直流断路器的动作可以有选择地将故障线路切除,不必全站闭锁,具有较高的可靠性和技术优势,也不会使得系统各位置出现明显的操作过电压,因此使用直流断路器隔离线路故障更优。

3)两种保护方案在隔离换流阀区域故障和直流线路故障时各有优劣。虽然包含直流断路器的动作方案加重了隔离换流阀区域故障时的操作过电压,但却使得直流线路故障不再成为导致直流配电网被迫退出运行的主要因素,柔直配电网的可靠程度将会显著提高。综合比较之下含直流断路器的保护动作方案在柔直配电网中具有更好的应用前景。

## 参考文献:

- [1] 于重阳.基于直觉模糊S-粗决策模型的储能变流器双环控制[J].大电机技术,2025(4):94-98.  
YU Chongyang. Dual loop control of energy storage inverter based on intuitionistic fuzzy S-rough decision model[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2025(4): 94-98.
- [2] 王伟亮,刘会巧,张天宇,等.基于多任务集成学习的储能电池

- 剩余使用寿命预测[J]. 电力建设, 2024, 45(11): 25-33.  
WANG Weiliang, LIU Huiqiao, ZHANG Tianyu, et al. Multi-task ensemble learning - based prediction of remaining useful life of energy-storage batteries[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(11): 25-33.
- [3] 钱广俊, 王鲁彦, 欧阳明高, 等. 基于降维机理模型的储能电池安全充电在线控制技术[J]. 电力工程技术, 2024, 43(1): 2-10.  
QIAN Guangjun, WANG Luyan, OUYANG Minggao, et al. On-line control technology for safe charging of energy storage batteries based on dimensionality reduction mechanism model[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(1): 2-10.
- [4] 李妍, 王青山, 张群, 等. 基于指标权重最优匹配的重力储能发电电动机并网方法[J]. 大电机技术, 2025(1): 69-75.  
LI Yan, WANG Qingshan, ZHANG Qun, et al. Grid connected method for generator/motor in gravity energy storage system based on optimal matching of indicator weight[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2025(1): 69-75.
- [5] 张勇军, 刘子文, 宋伟伟, 等. 直流配电系统的组网技术及其应用[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(23): 39-49.  
ZHANG Yongjun, LIU Ziwen, SONG Weiwei, et al. Networking technology and its application of DC distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 39-49.
- [6] 叶庞琪, 陈堃, 代维谦. 柔性直流配电技术的发展与现状[J]. 湖北电力, 2019, 43(1): 18-24.  
YE Pangqi, CHEN Kun, DAI Weiqian. Development and status quo of flexible DC power distribution technology[J]. Hubei Electric Power, 2019, 43(1): 18-24.
- [7] 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.
- [8] 魏晓光, 杨兵建, 汤广福. 高压直流断路器技术发展与实践[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3180-3188.  
WEI Xiaoguang, YANG Bingjian, TANG Guangfu. Technical development and engineering applications of HVDC circuit breaker[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3180-3188.
- [9] 吴益飞, 胡杨, 易强, 等. 中压直流开断技术研究综述[J]. 供用电, 2018, 35(6): 12-16.  
WU Yifei, HU Yang, YI Qiang, et al. Review on MVDC interruption technologies[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(6): 12-16.
- [10] 金鑫, 鲍永胜, 宁永龙. 面向特高压直流配电网的多源负荷智能调度[J]. 电子设计工程, 2025, 33(10): 125-129.  
JIN Xin, BAO Yongsheng, NING Yonglong. Intelligent scheduling of multi-source loads for ultra-high voltage DC distribution networks[J]. Electronic Design Engineering, 2025, 33(10): 125-129.
- [11] 郗鑫, 文韬, 韩彬, 等. 考虑变电站内接线和拓扑瞬态调整的断路器短路电流分析[J]. 电力建设, 2024, 45(7): 113-121.  
QIE Xin, WEN Tao, HAN Bin, et al. Analysis of short-circuit current of circuit breakers considering substation wiring and topology transient adjustment[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(7): 113-121.
- [12] 孔令哲, 何柏娜, 李辉, 等. 低压直流断路器拓扑参数对燃弧时长影响研究[J]. 南方电网技术, 2024, 18(2): 39-46.  
KONG Lingzhe, HE Baina, LI Hui, et al. Research on the influence of topology parameters of low-voltage DC circuit breaker on arcing duration[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(2): 39-46.
- [13] 张东进, 何柏娜, 程婷, 等. 基于振荡回路的光伏直流断路器拓扑结构设计[J]. 供用电, 2024, 41(6): 97-107.  
ZHANG Dongjin, HE Baina, CHENG Ting, et al. Topology design of photovoltaic DC circuit breaker based on oscillation circuit[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(6): 97-107.
- [14] 宋冰倩, 赵成勇, 许建中. 适用于直流电网的多端口限流式直流故障保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(4): 1185-1195.  
SONG Bingqian, ZHAO Chengyong, XU Jianzhong. Multi-port current-limiting HVDC fault protection scheme for DC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(4): 1185-1195.
- [15] 王顺亮, 李明, 辛清明, 等. 具备快速重合闸能力的低损耗低成本双向固态式直流断路器[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(12): 128-138.  
WANG Shunliang, LI Ming, XIN Qingming, et al. A low-cost bidirectional solid-state DC circuit breaker with low power loss and fast-reclosing capability[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(12): 128-138.
- [16] 章宝歌, 李国栋, 黄嘉宏, 等. 耦合电感辅助限流型混合式直流断路器拓扑[J]. 电力建设, 2025, 46(10): 23-33.  
ZHANG Baoge, LI Guodong, HUANG Jiahong, et al. Topology of a hybrid DC circuit breaker with coupled inductor-assisted current limiting[J]. Electric Power Construction, 2025, 46(10): 23-33.
- [17] 何秋萍. 基于柔性直流的 $\pm 10$  kV 配电网系统过电压与绝缘配合研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.  
HE Qiuping. Research on overvoltage and insulation coordination of  $\pm 10$  kV distribution system based on flexible DC[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [18] 苏宜靖. 直流配电网过电压仿真及设备绝缘配合的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.  
SU Yijing. Research on overvoltage simulation of DC distribution network and equipment insulation coordination[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [19] 肖芳磊. 中压柔性直流配电网过电压与绝缘配合方案研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.  
XIAO Fanglei. Research on overvoltage and insulation coordination scheme of medium voltage flexible DC distribution network[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [20] 熊岩, 黄润鸿, 郭铸, 等. 南澳三端柔性直流输电工程加装直流断路器的实时仿真[J]. 南方电网技术, 2018, 12(2): 34-40.  
XIONG Yan, HUANG Runhong, GUO Zhu, et al. Real-time simulation of Nan'ao three terminal VSC-HVDC project equipped with DC breaker[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(2): 34-40.
- [21] 韩永霞, 冯帅松, 高毓群, 等. 柔性直流配电网过电流及过电压防护研究综述[J]. 广东电力, 2020, 33(12): 81-89.

- Simulation, 2022, 39(5): 264-267.
- [29] 唐天缘. 隔离型DC-DC变换器关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2023.  
TANG Tianyuan. Research on key technologies for isolated DC-DC converters[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2023.
- [30] KACZMARCZYK P, KMON P. A prototype radiation energy measuring integrated circuit with an asynchronous current-pulse reset block providing analog-to-digital conversion in 28 nm CMOS[J]. Journal of Instrumentation, 2024, 19(4): 1088-1748.
- [31] 汪晶慧, 范鹏, 陈为. 基于直流励磁的磁性元件直流磁化特性测量与分析[J]. 电工电能新技术, 2025, 44(3): 99-108.  
WANG Jinghui, FAN Peng, CHEN Wei. Measurement and analysis of DC magnetization characteristic of magnetic component based on DC excitation[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2025, 44(3): 99-108.
- [32] 江进波, 王佳栋, 程廷强, 等. 基于场路耦合方法的100 kV脉冲变压器设计与磁饱和特性[J]. 高电压技术, 2022, 48(12): 4893-4903.  
JIANG Jinbo, WANG Jiadong, CHENG Tingqiang, et al. Design of a 100 kV pulse transformer based on field-circuit coupling method and its magnetic saturation characteristics research[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 4893-4903.
- [33] 易虹宇. 高效率隔离变换器的研究与设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2025.  
YI Hongyu. Research and design of high-efficiency isolation converters[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2025.
- [34] 江进波, 李毅, 曹宇, 等. 脉冲激励下铁基纳米晶磁芯的Jiles-Atherton模型参数辨识及应用[J]. 强激光与粒子束, 2024, 36(6): 129-137.  
JIANG Jinbo, LI Yi, CAO Yu, et al. Parameter identification and application of Jiles-Atherton model for Fe-based nanocrystalline cores under pulsed excitation[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2024, 36(6): 129-137.
- 支玉婷(2002—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为脉冲功率技术(E-mail: 17839238786@163.com)。  
张家兴(2000—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为脉冲功率技术(E-mail: ezjiaxing@163.com)。  
魏笔洋(1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为脉冲功率技术(E-mail: WeiBy0601@163.com)。  
江进波(1988—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为脉冲功率技术和高电压与绝缘技术(通信作者)(E-mail: jinbojiang@163.com)。

(上接第39页)

- HAN Yongxia, FENG Shuaisong, GAO Yuqun, et al. Review on research of overvoltage and overcurrent protection for flexible DC distribution system[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(12): 81-89.
- [22] 章寒冰, 林旭义, 宋艳, 等. 基于改进下垂曲线的柔性直流配电网电压控制方法研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(10): 161-166.  
ZHANG Hanbing, LIN Xuyi, SONG Yan, et al. Research on voltage control method of flexible DC distribution network based on improved droop curve[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(10): 161-166.
- [23] 冯天豪. 柔性中压直流配电网接地方式及故障暂态分析的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.  
FENG Tianhao. Research on grounding method and fault transient analysis of flexible medium-voltage DC distribution network[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [24] 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 Yu'ang, 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.
- [25] 戴志辉, 黄敏, 苏怀波. 基于MMC的环状直流配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.
- [26] MONADI M, ZAMANI M A, KOCH-CIOBOTARU C, et al. A communication-assisted protection scheme for direct-current distribution networks[J]. Energy, 2016(109): 578-591.
- [27] WANG Dongju, ZHOU Hao, DENG Xu. Switching overvoltage characteristics of 1 100 kV UHVDC converter station[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3): 1205-1212.
- [28] 李霞林, 郭力, 黄迪, 等. 直流配电网运行控制关键技术研究综述[J]. 高电压技术, 2019, 45(10): 3039-3049.  
LI Xialin, GUO Li, HUANG Di, et al. Research review on operation and control of DC distribution networks[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10): 3039-3049.
- 刘书瀚(1995—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统过电压与绝缘配合、柔性直流输配电、直流断路器等(通信作者)(E-mail: 100698175@qq.com)。