

基于新型柔性故障限流器的多端直流配电网故障隔离策略

郑 峰¹, 张锦松¹, 林燕贞², 陈志东³, 张 军⁴

- (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 福州供电公司, 福建 福州 350000;
3. 国网甘肃省电力有限公司 兰州供电公司, 甘肃 兰州 730050;
4. 国网湖北省电力有限公司 神农架供电公司, 湖北 神农架 442400)

摘要:针对多端直流系统故障电流峰值高、上升速度快以及无法保证非故障区域供电可靠性的问题,提出一种适用于中高压配电网的级联式新型柔性故障限流器与机械式直流断路器协同作用的故障隔离策略。首先通过微分欠压保护触发柔性故障限流器,实现极间电压箝位效果,抑制故障电流,提高直流系统故障隔离后的动态恢复特性。其次依据直流断路器的分断速度,实现故障限流器动作时间的灵活设置。利用断路器方向纵联保护信号保证故障区域换流站侧故障限流器的持续作用,直至直流断路器动作隔离故障。该策略还可避免换流站闭锁,降低断路器分断速度与开断容量要求,延长断路器使用寿命,提高系统供电可靠性。最后,在 MATLAB/Simulink 中搭建四端中压配电网模型,并通过仿真验证故障限流器的效果以及所提策略的可行性。

关键词:多端直流系统;配电网;柔性故障限流器;直流断路器;故障隔离策略;供电可靠性

中图分类号:TM 77

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202206012

0 引言

近年来,由于新型电力系统中高渗透率新能源的接入、高比例电力电子设备的应用、高增长率的直流负荷,使其呈现“三高”特性,传统交流电网的配电形式已无法满足发展需求,因此传输容量大、电能质量高、线路损耗低、控制更灵活的直流电网应运而生^[1-3]。

由于直流系统具有弱阻抗、弱惯性特点,发生故障时故障电流较大,且在几毫秒内就可达到峰值。然而现有直流系统所配置的电力电子器件耐流能力较差^[4],为防止系统故障对设备产生损伤,需要在短时间内切除故障。现有的直流电网故障隔离策略包括以下 3 种。①交流断路器配合隔离开关,此方法应用于早期直流电网的建设,例如文献[5]提出的“握手法”,该方法能够可靠识别并隔离直流区域的故障线路,但存在动作时间、恢复时间长的缺点且会导致整个直流区域停电,降低了系统供电可靠性。②基于变流器的故障自清除能力,传统的 AC/DC 整流器由于其内部换流器闭锁后仍将形成不控整流桥,因此无法阻止交流测持续馈入故障电流,大量国内外学者研究并提出了多种具有隔离能力的模块化多电平换流器子模块,其故障隔离原理为故障发生后闭锁全部绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT),将电容电压反极性投入故障路径当中实现故障电流的清除,但以上子模块均

存在投资成本高、隔离能力不足、阻断速度较长的缺点^[6-9]。③直流断路器(DC circuit breaker, DCCB)。直流断路器无疑是最适合直流故障隔离的设备,但发生直流故障时故障电流中不存在自然过零点,因此熄弧较为困难,且直流系统中感性元件存储着巨大的能量,进一步加大了直流故障的清除难度。而利用直流断路器进行直流电网的故障隔离是未来的主要发展趋势^[10-14]。

现有的故障隔离策略对直流断路器的分断速度和开断容量提出了很高要求^[15-16],而故障限流器可有效限制故障电流上升率及其幅值,因此可考虑将故障限流设备和传统保护方案相结合以实现灵活、快速、精准的故障隔离。文献[17-19]提出了一种基于限流电抗器自身条件的边界保护,但随着大量故障电流抑制策略的提出,限流电抗器的参量会越来越小,线路边界效应将被削弱。文献[20]提出了含故障限流器的保护时序配合方法,但其仅研究了故障隔离,对系统的恢复未作说明。文献[21-24]提出了超导式故障限流器和传统保护的配合策略,但超导故障限流器需要可靠的大容量冷却系统来避免故障限流器过热损坏,进一步扩大了超导故障限流器的体积和成本。现有基于故障限流器和保护配合的方案不足在于无法灵活应用故障限流器,仅是将故障限流器自身的限流特性与断路器进行时序配合,并未体现加入故障限流器后故障隔离策略有何变化,且故障限流器的体积、成本也需要进一步缩减。

针对上述问题,本文提出一种基于新型柔性故障限流器的多端直流配电网(multi-terminal DC dis-

收稿日期:2022-01-10;修回日期:2022-04-06

在线出版日期:2022-06-12

tribution network, MTDC)故障隔离策略。该策略首先将微分欠压保护嵌入新型柔性故障限流器控制模块中进行故障检测,其检测方式不受故障限流器参数变化的影响,检测到故障发生后故障限流器动作并迅速抬升电压至相应的故障设定电压值,实现电压箝位功能并将故障电流限制到较低水平;然后,通过方向纵联保护判断区内外故障,进一步分析基于电压源型换流器的 MTDC (voltage source converter based MTDC, VSC-MTDC) 直流系统中柔性故障限流器与机械式直流断路器配合的故障隔离策略,并阐述了柔性故障限流器和直流断路器配合的故障处理流程;最后,利用 MATLAB / Simulink 对本文所提策略的合理性进行仿真验证。

1 直流配电网设备

1.1 VSC

交流侧主网需要通过逆变器与直流配电网连接,常用于交直变换的换流器有 VSC 和电网换相换流器(line commutated converter, LCC),直流侧电压等级选取为 ± 5 kV,考虑到故障限流器配置和经济性问题,选取两电平 VSC 作为直流配电网与大电网之间的并网接口。

本文直流网络中的 VSC 拓扑结构如图 1 所示,该换流器由 IGBT 换流桥、滤波器、电容器等元件构成。图中: E_i ($i = a, b, c$) 和 i_i 分别为交流侧 i 相电压和 i 相电流; R 为线路等效电阻; L_{ac} 为滤波电感; C_{dc} 为直流侧电容; T_i 、 T'_i 分别为 i 相上、下桥臂的 IGBT; U_{oi} 为 i 相节点电压; U_{dc} 为直流母线电压; I_{dc} 为直流侧电流。

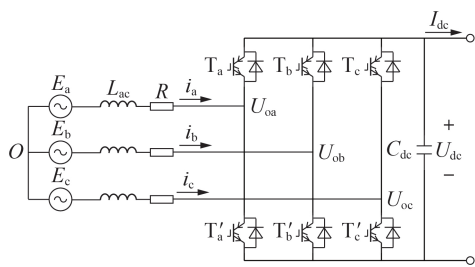


图1 VSC 拓扑结构

Fig.1 Topology structure of VSC

建立三相 VSC 数学模型,由基尔霍夫电压定律可得 VSC 三相电压回路方程为:

$$\begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{oa} \\ U_{ob} \\ U_{oc} \end{bmatrix} + L_{ac} \begin{bmatrix} \frac{di_a}{dt} \\ \frac{di_b}{dt} \\ \frac{di_c}{dt} \end{bmatrix} \quad (1)$$

根据基尔霍夫电流定律,可得直流侧电容正极节点的电流 I_c 为:

$$I_c = C_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c - I_{dc} \quad (2)$$

式中: S_i ($i = a, b, c$) 为 i 相开关函数,当 $S_i = 1$ 时上桥臂导通、下桥臂关断,当 $S_i = 0$ 时下桥臂导通、上桥臂关断。

基于派克变换,将式(1)、(2)从三相静止坐标系变换至 $dq0$ 同步旋转坐标,结果如式(3)所示。

$$\begin{cases} E_d = u_d + L_{ac} \frac{di_d}{dt} - \omega L i_q \\ E_q = u_q + L_{ac} \frac{di_q}{dt} + \omega L i_d \\ C_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} (S_d i_d + S_q i_q) - I_{dc} \end{cases} \quad (3)$$

式中: ω 为同步角频率; E_d 、 E_q 分别为 d 轴、 q 轴相电压; u_d 、 u_q 分别为 d 轴、 q 轴电阻电压; S_d 、 S_q 分别为 d 轴、 q 轴开关函数分量; i_d 、 i_q 分别为 d 轴、 q 轴电流。

稳态情况下,假设系统三相对称,即不存在零序分量,采用电网电压定向矢量控制,即 $E_d = E_m$, $E_q = 0$,其中 E_m 为相电压幅值,则并网有功功率 P 和无功功率 Q 分别为:

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} (E_d i_d + E_q i_q) = \frac{3}{2} E_d i_d \\ Q = \frac{3}{2} (E_q i_d - E_d i_q) = -\frac{3}{2} E_d i_q \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可知,通过分别控制 i_d 和 i_q 可以达到控制稳态有功和无功的目的。VSC 根据直流配电网的工作模式可分为 PQ 控制和恒压控制,控制模型此处不再详述。

1.2 机械式直流断路器

本文在故障限流器配合的基础上选取机械式直流断路器,故障限流器对于故障电流幅值和上升率的限制降低了断路器对于故障的速断性,因此选用经济性更强、结构更简单的机械式直流断路器。

机械式直流断路器的结构见图 2。系统正常工作时,工作电流通过主电流支路流过机械开关 K ,静态损耗极低,直流侧发生故障时,机械开关断开燃弧,由于短路电流无自然过零点,难以灭弧,而机械式直流断路器在交流断路器的基础上加入 LC 自激振荡结构,从而产生反向电流与故障电流相互抵消并达到过零点,此时进行灭弧操作,电流被转移至耗

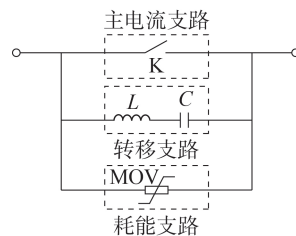


图2 机械式直流断路器结构

Fig.2 Structure of mechanical DC circuit breaker

能支路,通过避雷器吸收故障能量,从而消除故障。

1.3 新型柔性故障限流器

本文提出的新型柔性故障限流器结构如图3所示。图中: $U_{L_1}^+ - U_{L_n}^+$ 和 $U_{L_1}^- - U_{L_n}^-$ 分别为限流电感正极和负极电压; U_{L_i} 和 U_{R_i} 分别为线路等效电感电压和等效电阻电压; U_R 为负载电压; T_1 为理想型三相高压变压器; $VSC(+)$ 和 $VSC(-)$ 分别为向正极和负极限流电感提供电压的VSC。该新型柔性故障限流器可运行在中高压配电网中,并采用级联形式以满足限流效果和经济性需求。当系统正常运行时,柔性故障限流器被整流电路旁路,降低了系统正常运行时故障限流器造成的影响;当系统发生故障时,整流结构向限流电感提供反向箝位电压,减少电容放电,降低故障电流。

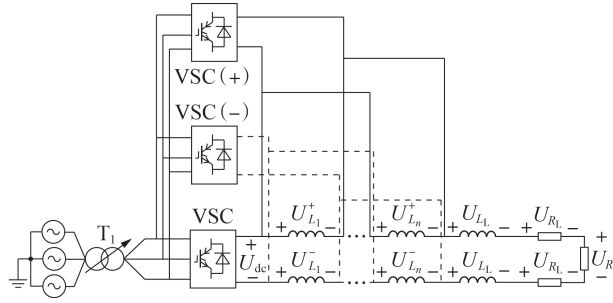


图3 本文所提柔性故障限流器结构

Fig.3 Structure of proposed flexible fault current limiter

通过整流器提供的线性电流,限流电感的两端电压被控制在一个稳定的数值。因此,将限流电感的电压 U_L 作为柔性故障限流器换流站的控制目标。双环控制的表达式如下:

$$U_L = \frac{KG_1 G_2}{1 + KG_1 G_2 K_{vf}} U_{set} - \frac{G_2}{1 + KG_1 G_2 K_{vf}} i_q \quad (5)$$

$$G_i = K_{pi} + K_{fi}/s \quad i = 1, 2 \quad (6)$$

式中: i 取值为1、2分别表示电压外环和电流内环控制; K 为放大增益; K_{vf} 为反馈系数; U_{set} 和 i_q 分别为双环控制系统中的输入量和扰动量; K_{pi} 为比例增益; K_{fi} 为积分增益。

当系统正常运行时,交流侧不向限流电感提供电压,故 $U_{L_1}^+ - U_{L_n}^+$ 和 $U_{L_1}^- - U_{L_n}^-$ 接近0,静态损耗极低,此时的系统回路电压方程为:

$$U_{dc} = U_{L_i} + U_{R_i} + U_R \quad (7)$$

当系统发生故障时,交流侧通过整流器向各限流电感提供反向电压,此时的系统电压回路方程为:

$$\begin{cases} U_{dc} = U_{L_i} + U_{R_i} + U_R + U_{L_1}^+ + U_{L_2}^+ + \dots + U_{L_n}^+ \\ U_{L_1}^+ + U_{L_2}^+ + \dots + U_{L_n}^+ = U_{L_1}^+ - U_{L_1}^- + U_{L_2}^+ - U_{L_2}^- + \dots + U_{L_n}^+ - U_{L_n}^- \end{cases} \quad (8)$$

由于负载和线路等效电阻上的电压较小,存在

$U_{dc} \approx U_{L_1} + U_{L_2} + \dots + U_{L_n}$,故电容电压被箝位为柔性故障限流器两侧电压,故障电流是由于直流侧电容在短时间内放出极大的电压值而产生的,当电容放出的电压值降低到极小值时,故障电流幅值同样被削弱到极小值;且故障限流器加入系统后,自身电感还会降低故障电流上升率,从而达到双重限流效果。

考虑到本文所设置的电压等级为 ± 5 kV,若故障限流器采取单个电感的模式,则需要将单个电感两端的电压抬升到接近5 kV,故需要选择大电感以满足电压要求,但这样会产生体积较大或者耐流容量需求较高的尺寸和经济性问题;如果选取小电感,则电感会瞬间饱和,无法达到限流效果。根据上述问题,在 ± 5 kV网络中选取串联电感模式的柔性限流模块,可以首先在 ± 500 V网络中测试选出考虑到尺寸和经济性问题的电感参数,再将其按数量对等安装到直流侧正、负极线路初始端处,即正、负极各包含5个级联子模块,电感选取要求参考式(9)。

$$L_F \geq \frac{U_{dc} R_{load}}{i_{up}^{max} (R_{load} + R_L)} - L_L - L_{dc} \quad (9)$$

$$i_{up}^{max} \approx \frac{I_{smax} - I_N}{t_{smax} - t_0} \quad (10)$$

式中: L_F 为限流电感; R_{load} 为负载电阻; R_L 和 L_L 分别为线路电阻和电感; L_{dc} 为平波电抗器电感; I_{smax} 为短路电流峰值; t_{smax} 为达到短路电流峰值所需要的时间; I_N 为额定电流; t_0 为直流系统运行在额定状态时的初始时间; i_{up}^{max} 为最大电流上升率。

针对限流电感的饱和问题提出如下解决方法,当限流电感饱和后,流过限流电感的电流的斜率不再上升,而是稳定在一个定值,此时电感两端的电压不能维持稳定,无法箝位电容电压,失去限流效果,因此采取如图4所示的闭合铁芯结构消除电感饱和状态。图中: L_s 、 L_k 分别为限流侧、控制侧电感; N_1 、 N_2 分别为限流侧、控制侧绕组匝数; φ_1 、 φ_2 分别为限流侧、控制侧电感磁通; k 为受控源控制系数; I_1 为通过限流电感的电流。限流电感的饱和即限流电感内部磁通饱和,该结构通过二次侧受控源作用,经 L_k 向 L_s 提供反向磁通,以此限制 L_s 内部的上升磁通,达到去饱和效果。

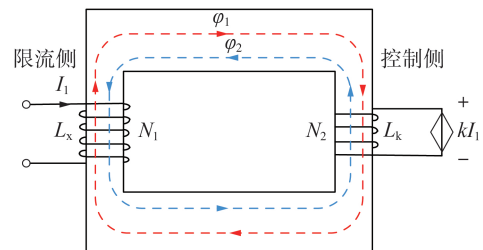


图4 闭合铁芯结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of closed core structure

闭合铁芯的磁通回路方程为:

$$\begin{cases} \varphi_1 = L_x I_1 \\ \psi_1 = N_1 \varphi_1 \\ e_1 = d\psi_1 / dt \end{cases} \quad (11)$$

式中: e_1 为限流侧绕组电压; ψ_1 为总磁通。

由式(11)推导得限流电感电压表达式为:

$$e_1 = \frac{d(N_1 L_x I_1)}{dt} \quad (12)$$

式(12)中, e_1 保持不变, N_1 为固定值, 故 $L_x I_1$ 的数值呈线性, 而 L_x 的电感值能够自适应变化以保证 e_1 为稳定值。因此只要 L_x 不饱和, 且保证 $L_x I_1$ 的线性, 限流电感的箝位电压就能被稳定控制。

避免柔性故障限流器电感瞬时达到饱和态而失去限流效果后, 仍需考虑到尺寸和经济性问题, 故选用何种材质的电感作为故障限流器电感十分重要。电感多数以带绕铁芯制成, 带绕铁芯材料主要包括硅钢片、坡莫合金和非晶合金。其中, 硅钢片和坡莫合金均属于晶态材料, 硅钢具有高饱和磁感应值, 但其磁导率较低; 坡莫合金具有高初始磁导率、低矫顽力和损耗, 但其价格较为昂贵; 而非晶材质则兼具高磁导率、耐高温性强、体积小且造价便宜的优点, 更能够满足柔性故障限流器的需求, 故选取非晶材质电感作为新型柔性故障限流器电感。

2 短路故障分析

直流系统中的主要线路故障包括单极接地故障、双极短路故障以及断线故障, 本文主要研究柔性故障限流器在直流配电网中和传统保护配合的故障隔离策略, 该故障限流器在发生单极接地故障以及双极短路故障时均可起到电压箝位的限流作用, 故针对单极接地故障及双极短路故障特性进行分析。

2.1 单极接地故障

在直流系统中, 发生单极接地故障的故障点位置对于故障特性没有影响, 但交流侧变压器接地方式以及直流侧电容中点接地方式会对故障特性产生较大影响, 考虑到经济性等因素, 本文仅针对 Δ / Y_n 接线、直流侧电容中点直接接地的情况, 即由单个换流器构成的双极接线方式进行讨论, 直流侧接线方式如附录A图A1所示。

单极接地故障发生后, 接地侧直流母线对地电压降为0, 若不考虑避雷器作用的情况, 则非故障极对地电压将上升到额定值的2倍, 故障点与接地点间形成放电回路, 造成直流侧电流发生改变; 交流侧由于接地点电压偏移, 导致直流偏置的出现, 由于故障点功率的馈入消耗, 交流侧电流增大。装设柔性故障限流器后, 单极接地故障故障特性改变, 且由于正、负极接地故障特性相似, 本节仅分析正极接地故障。

设置直流系统0.5 s发生正极接地故障, 则装设新型柔性故障限流器前后的正极接地故障特性如图5所示。图中: U_{dc}^+ 、 U_{dc}^- 分别为正、负极电压。由图可见: 未装设新型柔性故障限流器时, U_{dc}^+ 下降至0, U_{dc}^- 的大小上升至10 kV, 直流侧电流瞬间上升至额定值的十几倍, 极间电压经暂态冲击后恢复至额定值; 装设新型柔性故障限流器后, 故障瞬间直流侧电流约为额定值的3倍, 仅为未装设新型柔性故障限流器时的1/4, 而 U_{dc}^+ 被箝位至4 kV, 因此 U_{dc}^- 的大小仅上升至6 kV, 故极间电压暂态变化不明显, 系统相对更加稳定。

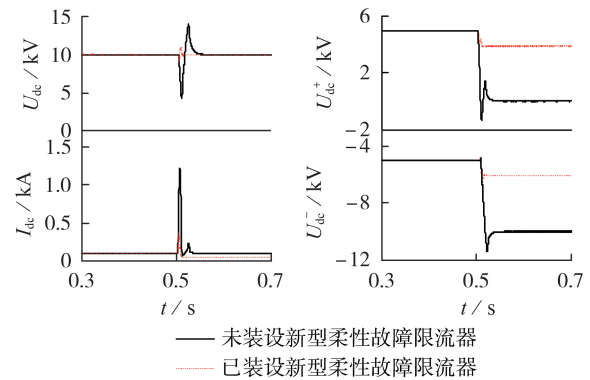


图5 正极接地故障特性

Fig.5 Characteristics of positive-pole grounding fault

2.2 极间短路故障

直流配电网发生极间短路故障后, 直流线路极间电压迅速降为0, 直流电流迅速增大, 配电网中变换器功率传输全部中断, 由于换流器由电力电子器件构成, 为保护换流器, 在检测到故障发生后, 当流过换流器的短路电流超过阈值后, 换流器立即闭锁。极间短路故障回路如附录A图A2所示。

短路故障发生后暂态过程可分为3个阶段, 如附录A图A3所示, 具体分析如下。

1) 直流侧电容放电阶段。故障发生时, 直流侧电容电压大于交流侧线电压, 此时由电容向故障回路供电, 交流侧仅有线抗续流。该阶段电容电压迅速下降, 故障电流则急剧上升。

2) 二极管交替不控整流阶段。当直流侧电容电压下降至交流侧线电压后, 交流侧开始通过不控整流桥向故障点馈流, 直流侧电容继续放电, 故障电流持续上升。

3) 二极管全部导通阶段。当电容放电至电压为0后, 二极管由于直流侧电抗反电动势作用全部导通, 直流侧短路电流开始下降, 交流侧类比三相短路故障, 迅速过流, 此时换流器同时承受直流侧和交流侧短路电流冲击, 之后转为故障稳态阶段。当装设新型柔性故障限流器后, 暂态过程发生变化, 由于故障限流器的电压箝位作用, 阶段2)、3)不再发生, 故

障阶段等效模型如图 A3(c)所示。图中: L_{FCL} 为故障限流器电感; R_s 和 L_s 分别为交流线路等效电阻和电感。

短路故障处于电容放电阶段时呈二阶电路形式,故该阶段的暂态过程可表示为:

$$LC \frac{d^2 u}{dt^2} + R_L C \frac{du}{dt} + u = 0 \quad (13)$$

$$L = L_L + L_{\text{FCL}}, \quad u = u_C - u_{\text{FCL}} \quad (14)$$

式中: u_C 为电容电压; u_{FCL} 为限流电感电压。

通常, $R < 2\sqrt{L/C}$, 故电容放电阶段是二阶欠阻尼振荡过程,式(13)的特征根为 1 对共轭复数,如式(15)所示。

$$\lambda_{1,2} = -\frac{R_L}{L} \pm \sqrt{\left(\frac{R_L}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} = -\sigma \pm j\omega \quad (15)$$

$$\text{式中: } \sigma = \frac{R_L}{2L}; \omega = \sqrt{\left(\frac{R_L}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}.$$

假设故障瞬间直流电压和直流电流的值分别为 U_0 、 I_0 , 由此可求得极间电压和故障电流的暂态解为:

$$\begin{cases} u = Ae^{-\sigma t} \sin(\omega t + \theta) \\ i_s = A \sqrt{\frac{C}{L}} e^{-\sigma t} \sin(\omega t + \theta - \beta) \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} A = \sqrt{U_0^2 + \left(\frac{U_0 \sigma}{\omega} - \frac{I_0}{\omega C}\right)^2} \\ \theta = \arctan \frac{U_0}{\frac{U_0 \sigma}{\omega} - \frac{I_0}{\omega C}} \\ \beta = \arctan \frac{\omega}{\sigma} \end{cases} \quad (17)$$

由式(16)可以看出,短路电流大小与直流侧电容、线路阻抗有关。当系统容量以及电压等级不变时,电容越大,则故障前存储的能量越多,故障后的放电电流越大;电抗越大,则存储同等能量时所需的电流越小,因此故障电流越小;电阻越大,则流过电阻的故障电流越小,这一特点符合物理特性。而加入故障限流器后,实现了对电容电压的箝位作用,故减少其放电来达到限流效果。

设置直流线路于 0.5 s 发生极间短路故障,则装设新型柔性故障限流器前后的极间短路故障特性如图 6 所示。装设新型柔性故障限流器前,直流侧电容首先放电至交流侧线电压,电流急剧上升,处于直流侧电容放电阶段;当电容电压降为 0,短路电流持续上升至峰值(约为 1.8 kA)时,处于二极管交替不控整流阶段末端,直流侧电容放电、二极管交替不控整流阶段的总时长约为 3~4 ms;此后,形成 RL 一阶放电回路,短路电抗经续流二极管放电,故障电流持

续衰减,即二极管全部导通阶段。装设新型柔性故障限流器后,由于故障限流器箝位作用,电容电压在经过短暂波动后恢复至稳态,被箝位至 8 kV,故障电流被限制在 400 A 以下,并逐渐恢复至稳态,从而实现了故障隔离。

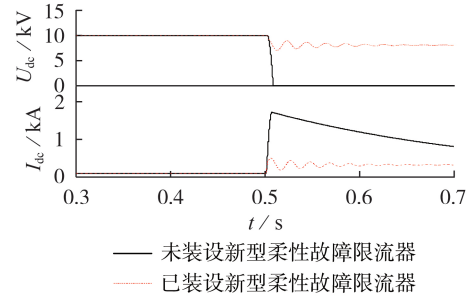


图 6 极间短路故障特性

Fig.6 Characteristics of inter pole short circuit fault

3 基于新型柔性故障限流器的故障隔离

直流配电网目前的保护配置仍然不够完善,多为借鉴交流系统及直流输电系统的保护策略,例如过流、欠压、电压电流微分、差动保护等方式,单种保护无法满足直流侧需求,通常需要将多种保护配合使用,且与成熟的交流保护设备相比,直流侧保护设备仍处于发展阶段,将故障限流器的控制方式和保护方案相结合的方式也还未体系化。本文在柔性故障限流器控制策略中嵌入微分欠压保护,可以在极短时间内监测故障,限制故障电流并配合机械式直流断路器切除故障,避免换流站闭锁,使得系统在故障隔离后可以迅速投入运行。

3.1 故障限流器控制策略

以正极级联模块柔性故障限流器为例,视级联模块故障限流器仅包含单个电感,其整流侧控制策略及输入侧嵌入式保护控制方式如附录 A 图 A4 所示。柔性故障限流器控制如图 A4(a)所示。图中: U_{set} 为故障限流器控制系统中的输入量; i_q 为扰动量。图 A4 仅列出单个柔性故障限流器电感的控制思路,控制目标为电感电压,采取级联模式时,将柔性故障限流器给定的电压阈值除以级联个数即可。在本文的设定条件下,发生单极接地故障和双极短路故障时柔性故障限流器总电压应分别抬升至 4 kV 和 8 kV。本文的柔性故障限流器由 10 个电感子模块级联而成,则发生单极接地故障和双极短路故障时单个柔性故障限流器电感应分别抬升至 400 V 和 800 V。该柔性故障限流器整流控制方式使用定电压定电流双环控制,由于输出侧为电感,即无功储能元件,故针对电流环采用 q 轴控制。故障限流器电压输入信号控制方式如图 A4(b)所示, U_{set} 的设定需要以故障检测形式给出,综合检测速度、精度考

虑,使用电压微分及欠压相结合的检测方式,可以在故障瞬间启动故障限流器,并针对单极接地故障和极间短路故障进行快速诊断并给定对应控制输入量。具体实施方式如下。

1)对直流侧极间电压微分值进行监测,当发生故障时,电压微分值瞬间升高到最大值,观察单极接地故障和极间故障发生后电压微分的最大值并在 Simulink 中采样 Relay 模块设定电压微分触发阈值,当故障发生后信号触发输出为 1,通过 Monostable 模块保持触发信号一定时间(即柔性故障限流器动作总时间),并向柔性故障限流器输入 40% 的额定电压,在第一时间箝位电容电压,抑制电容在短时间内放电,从而避免产生过大的短路电流。由于故障类型、故障位置、过渡电阻等均会对其整定阈值产生一定影响,故针对不同运行状态下的影响因素,确定影响值因素规律,取规律区间内的极小值作为整定依据^[25]。

2)由于采用电压微分无法准确判断故障类型为单极接地故障还是极间短路故障,故对控制输入量采取第二阶段的欠压判断,由于电容放电至判断参量值存在毫秒级延时,故该阶段判断与第一阶段同时进行。当正极电压或负极电压仅有一方不超过额定值的 90% 时,判断直流侧发生单极接地故障,不再向柔性故障限流器输入电压;当正极电压与负极电压均不超过额定值的 90% 时,判断直流侧发生极间短路故障,再次向柔性故障限流器输入额定电压的 40%,抬升电容电压至额定电压的 80%,此时故障电流被限制在接近额定电流水平。图 A4(b)展示的是将柔性故障限流器装设在正极线路时的控制策略,若将柔性故障限流器电感装设在负极线路,则无需改变其电压控制方式,仅将输入值变为负值即可。将第二阶段的判断阈值设为额定值的 90% 是因为直流系统中规定电压降至额定值的 10%~90% 时为电压暂降现象。

3)故障发生后迅速扩大至整个网络,各换流站出口的柔性故障限流器均监测到故障并启动,为防止柔性限流电感饱和,闭环铁芯模块同时启动,且需要对柔性故障限流器加入区内外故障判断环节,从而关断故障区外的柔性故障限流器,降低能量损耗。故障发生后柔性故障限流器需瞬时动作,所以判断为区内故障时,保持柔性故障限流器运行;判断为区外故障时,旁路区外的柔性故障限流器。因此当柔性故障限流器接收到故障微分信号或者区内故障信号时,保持原本的电感电压输入控制量不变,实现故障隔离;当其接收到区外故障信号时,将输入控制量清零,避免区外柔性故障限流器产生非必要的损耗。故障隔离后,闭环铁芯模块持续动作抵消限流电感所存储的能量,以更好地应对下一次故障的发生。

3.2 区内外故障判断

当直流侧发生短路故障后,任意一端变流器直流侧线路故障电流方向如附录 A 图 A5 所示。由图可见,无论是单极接地故障还是极间短路故障,故障极电流方向均有以下特点:若正极线路为故障极,则故障电流从母线流向线路;若负极线路为故障极,则故障电流从线路流向母线。故本文设置正极线路的方向性过流保护正方向为母线流向线路,负极线路的方向性过流保护正方向为线路流向母线。当发生单极接地故障时,仅故障极方向性过流保护动作,发生极间短路故障时,两级方向性过流保护均动作,以此判别故障类型及故障极^[26]。在此基础上,设置如附录 A 图 A6 所示的方向纵联保护策略。考虑到方向纵联保护中光纤接入的经济性问题,仅在直流侧线路正极装设方向性过流保护以识别故障区域,故障类型可通过柔性故障限流器控制策略判断。当线路 1 发生极间短路故障时,保护 12、21 均检测到正方向过流,并通过光纤向对端传递正向过流信号,由于信号正向对等可判断故障发生在换流站 1、2 之间,即区内故障;保护 32、34、41 虽然也检测到正方向过流,但其对端保护均不动作,光纤信号不对等,判断为区外故障。在完成区内外故障判断后,根据柔性故障限流器控制原理与直流断路器进行配合,实现故障隔离。

3.3 柔性故障限流器与直流断路器配合原理

以单侧换流站为例,忽略线路阻抗,在正、负极线路上均装设柔性故障限流器和平波电抗器,仅在正极线路出口处装设机械式直流断路器,配置接线如附录 A 图 A7 所示。

线路中发生极间短路故障后,若直流侧不含故障限流器仅靠直流断路器切除故障,则回路电压方程以及故障电流变化率为:

$$\begin{cases} U_{dc} = U_{dccb} + 2L_{dc} \frac{dI_{dc}}{dt} \\ \frac{dI_{dc}}{dt} = \frac{U_{dc} - U_{dccb}}{2L_{dc}} \end{cases} \quad (18)$$

式中: U_{dccb} 为断路器电压; L_{dc} 为直流单侧换流站配置中的平波电抗器电感。

当 $U_{dccb} \geq U_{dc}$, 即满足 $dI_{dc}/dt < 0$ 时,直流断路器耗能支路的避雷器由于自身残压超过直流电压而开始动作,因此故障电流开始下降。

加入柔性故障限流器后,回路电压方程以及故障电流变化率为:

$$\begin{cases} U_{dc} = U_{dccb} + 2L_{dc} \frac{dI_{dc}}{dt} + 2u_{FCL} \\ \frac{dI_{dc}}{dt} = \frac{U_{dccb} + 2u_{FCL} - U_{dc}}{2L_{dc}} \end{cases} \quad (19)$$

此时回路电压方程发生改变,故障电流下降条

件也发生相应变化,即 $U_{\text{decb}} + 2u_{\text{FCL}} \geq U_{\text{dc}}$,当柔性故障限流器和直流断路器两端的电压之和超过直流侧电压时,故障电流将会跌落。由于加在柔性故障限流器两端的电压远超断路器残压,故加入柔性故障限流器后可忽略直流断路器残压,从而起到良好的限流效果。同时,利用柔性故障限流器既能够限制故障电流幅值,又能够限制故障电流上升率,在故障发生初期,可以保持换流站不因过电流而闭锁,同时降低直流断路器的分断速度和容量要求。

直流侧发生故障时,直流断路器满足触发条件后动作,根据3.1、3.2节中所提策略,设计如附录A图A8所示的直流断路器动作原理。设置两段式断路器跳闸信号,当同时满足柔性故障限流器电压超过额定电压的40%以及经过方向纵联保护判断为区内故障后,直流断路器跳闸。

若直流侧发生短路故障,则柔性故障限流器瞬时动作,同时方向纵联保护动作判断区内外故障,直流断路器接收到柔性故障限流器电压故障信号以及区内外故障信号后选择性动作,即断开区内故障两侧的直流断路器,区外换流站柔性故障限流器动作后在接收到区外故障信号后恢复旁路运行,避免区外断路器动作和柔性故障限流器的能量损耗,以减少开关动作次数、增长其使用寿命,同时缩小停电范围,解决了区外断路器动作及换流站闭锁后的线路过载问题,增强直流侧供电可靠性。

4 仿真实验

基于MATLAB/Simulink搭建四端环状直流配电网仿真模型,四端换流站均采用VSC拓扑结构,仅在换流站出口处安装新型柔性故障限流器以降低成本,设置直流线路电阻 $r_0 = 0.015 \Omega/\text{km}$ 、电感 $L_0 = 0.1 \text{ mH}/\text{km}$,不考虑过渡电阻的影响,系统其他结构和运行参数分别见附录A图A9、表A1。设0.5 s换流站1出口发生极间短路故障,结合仿真模型,对本文所提故障隔离策略进行分析和验证。

4.1 仅含故障限流器的动作效果

本节仅对换流站1侧故障状态进行仿真,设置0.5 s换流站1侧出口1 km处发生极间短路故障,保持新型柔性故障限流器监测到故障发生后动作0.5 s,同时加入电感式超导故障限流器(resistive superconducting FCL, R-SFCL),观察其限流效果,并与新型柔性故障限流器的限流效果进行对比,仿真结果如附录A图A10所示。

故障发生后,不装设故障限流器的情况下,直流侧极间电压迅速跌落至0,故障电流随之以约300 kA/s的速度上升,其峰值超过1.5 kA,为正常运行时的十几倍,对换流站及直流系统中各电力电子元件造成冲击性损害。在加入R-SFCL的情况下,

系统正常工作时其表现为超导特性,不影响系统正常运行,当发生短路故障后,外界条件使得超导绕组失超,呈阻性特征减缓直流侧极间电压的下降速率,同时限制故障电流上升率及幅值,此时故障电流最大值低于1 kA,相较无故障限流器作用时降低了约1/3。当加入新型柔性故障限流器时,故障电流幅值约为额定值的5倍,低于500 A,相比超导故障限流器作用下的电流幅值更低,且极间电压下降速率与超导故障限流器相比较慢,但极间电压在下降到和柔性故障限流器电压上升曲线交点处后开始抬升,经振荡后最终箝位到8 kV,可在故障隔离后更快恢复正常运行,限流效果显著。

R-SFCL从限流结束恢复至超导特性需较长时间,难以满足直流侧保护系统重合闸的时限要求,且其处于失超态时会产生大量热能,需要可靠的大容量冷却系统来避免故障限流器过热损坏,进一步增加了超导故障限流器的体积和成本。与超导故障限流器相比,新型柔性故障限流器由电力电子元件构成,可控性更强,在限流结束后恢复至初始状态更加迅速,以更好地应对下一次故障。由于新型柔性故障限流器自身带有闭合铁芯结构可避免电感饱和,降低对限流电感参量的要求,且该柔性故障限流器电感如1.3节所述采用非晶材质,相比超导故障限流器具有体积更小、造价更低、限流效果更好的优点。

0.5 s发生极间短路故障时,柔性故障限流器两端电压如附录A图A11所示。由3.1节可知,柔性故障限流器需将其两端电感电压抬升至8 kV,其中正、负极级联模块分别抬升4 kV,由于级联模块总数为10,正、负极均由5个子模块构成,故单个子模块电感电压应抬升至800 V。柔性故障限流器总电压呈现较为良好的上升及保持曲线,级联形式并未导致电压波动情况,验证了柔性故障限流器采取级联模式应用于中压配电网的可行性。

4.2 仅含直流断路器的故障隔离

若在直流侧仅装设机械式直流断路器而不装设柔性故障限流器,则0.5 s时直流侧发生极间短路故障时的仿真结果如附录A图A12所示。

0.5 s时直流侧发生极间短路故障,换流站1、2为近故障端,其极间电压在5 ms内跌落至0,故障电流随之达到峰值,均超过1.6 kA,换流站桥臂电流在2 ms内超过自保护阈值(额定电流的3~5倍)而闭锁保护,当极间电压下降到0后故障电流开始减小;其他换流站为远故障端,故障电流上升较慢且幅值相对较小,约在6 ms上升至1.4 kA。故障发生后3 ms,方向纵联保护监测到区内故障信号向DCCB₁₂和DCCB₂₁发出分闸指令,机械开关分闸燃弧,转移支路投入产生谐振过零点,故障发生后15 ms耗能支

路导通排放能量,各端口电压经冲击后恢复至额定状态,故障电流随之降低,经过暂态波动后,四端换流站出口电流恢复至稳态,故障切除后,换流站1、2由于所供负载减少,其出口电流下降至50 A,其余两端换流站出口电流维持100 A不变,由图A12(c)可知,整个分断过程时长超过18 ms。

在上述过程中,故障电流幅值大且持续近20 ms,对直流侧电力电子设备造成了冲击性损害;针对瞬时性故障,由于四端换流站均闭锁,导致整个直流系统停运,之后再次投入运行需要经历直流侧电容预充电过程,无法通过重合闸操作保障直流系统快速恢复正常运行。且仅含断路器的故障隔离对于断路器的分断速度和分断容量要求较高,因此,仅通过直流断路器实现故障隔离具有一定局限性。

4.3 故障限流器与断路器配合的故障隔离

设置换流站1出口侧于0.5 s时发生极间短路故障,仿真结果如附录A图A13所示,本节重点分析故障限流器同断路器配合的故障处理过程。

故障发生瞬间柔性故障限流器监测到故障微分信号并启动,故障限流器两端电压抬升至8 kV需要2.5 ms,故所有换流站端口电压先行跌落至近7 kV,此时由于故障限流器电压箝位作用,极间电压不再跌落,且故障电流达到峰值约为500 A,仅为不装设故障限流器时故障电流峰值的1/3。由图A13(c)、(d)可知,故障发生后1 ms内, $DCCB_{12}$ 、 $DCCB_{21}$ 均监测到正方向过流信号,并经历约2 ms延时后接收到对端信号,则判断故障发生在换流站1、2之间,换流站1、2出口处的柔性故障限流器接收到区内故障信号,继续保持两端电压不变,而换流站3、4出口处的柔性故障限流器接收到区外故障信号后,控制其两端电压跌落至0,由于故障尚未切除,其两端电压会出现一些暂态波动。 $DCCB_{12}$ 、 $DCCB_{21}$ 随即监测到柔性故障限流器电压及区内故障信号后动作隔离故障,其余断路器均不动作,故障隔离周期约为20 ms,故障隔离后柔性故障限流器恢复旁路状态,四端换流站电压电流经振荡后恢复稳定。由于换流站电力电子器件过流容量约为额定运行容量的3~5倍,故可据此设置换流站阈值以避免故障后换流站闭锁。

此过程中,故障限流器动作仅持续20 ms,与仅含断路器放入清除故障策略相比,限制了故障电流,避免了换流站闭锁,并箝位换流站出口电压使得故障隔离后快速恢复正常运行,降低了对直流断路器分断速度和开断容量的要求,验证了所提故障隔离策略的有效性,提高了直流侧的供电可靠性。

5 结论

针对VSC-MTDC系统短路故障问题,提出了一

种新型柔性故障限流器与机械式直流断路器配合的故障隔离策略。建立四端环状直流配电网模型,进一步分析柔性故障限流器和直流断路器的配合原理,提出直流断路器动作原理框图和故障处理流程。在MATLAB/Simulink平台仿真验证本文所提故障隔离策略,得出以下结论:

1)新型柔性故障限流器在系统正常运行时处于旁路状态,对系统几乎不产生影响,发生故障后故障限流器通过交流侧整流抬升其两端电压起到箝位作用,改变直流侧放电状态,减缓故障电流上升速度,同时降低故障电流幅值,削弱对直流断路器分断速度和开断容量的要求;

2)该柔性故障限流器由电力电子器件及其控制模块构成,可通过调整其控制模块应对不同故障状况,灵活度较高,并可根据直流侧断路器的分断速度设置其动作时间,故障隔离后立即恢复旁路状态,通过闭合铁芯结构耗尽故障限流器电感所储存的故障能量,以便于更好地应对下一次故障;

3)所提柔性故障限流器配合断路器的故障隔离策略,在直流系统发生短路故障后可以实现仅开断故障区内断路器,缩小停电范围,避免整个MTDC系统崩溃,且能够限制故障电流上升率以及幅值避免换流站闭锁,使得故障隔离后换流站及时投入运行,提高了系统供电可靠性。

本文提出了限流电路拓扑以及同断路器配合的直流故障隔离策略,对于该故障限流器的并网整流器控制系统的响应速度、扰动量的影响以及同断路器的协调作用控制方案等方面,将作为下一步的研究工作。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] SHENG Siqing, ZHAN Zhigang, FU Yuan. The research on inertial control strategy of DC distribution network[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 804(3): 1-5.
- [2] FAN Yiwen, CHI Yongning, LI Yan, et al. Key technologies for medium and low voltage DC distribution system[J]. Global Energy Interconnection, 2021, 4(1): 91-103.
- [3] 卫志农, 裴蕾, 陈胜, 等. 高比例新能源交直流混合配电网优化运行与安全分析研究综述[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 85-94.
- [4] WEI Zhinong, PEI Lei, CHEN Sheng, et al. Review on optimal operation and safety analysis of AC/DC hybrid distribution network with high proportion of renewable energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 85-94.
- [4] 金恩淑, 杨筱凡, 于新, 等. MMC-HVDC直流侧极间短路暂态特性分析[J]. 电测与仪表, 2020, 57(23): 30-37.
- [4] JIN Enshu, YANG Xiaofan, YU Xin, et al. Analysis of DC side pole to pole fault transient characteristic in MMC-HVDC[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2020, 57(23):

- 30-37.
- [5] 张兆云,林璞,王星华. 交直流混合配电网继电保护研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(5):179-187.
ZHANG Zhaoyun, LIN Pu, WANG Xinghua. Review on relay protection of AC/DC hybrid distribution grids[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 179-187.
 - [6] 赵思远,徐康泰,郎博宇,等. 基于故障清除专用自阻模块的改进型MMC运行控制策略[J]. 电力自动化设备,2021,41(5):189-195.
ZHAO Siyuan, XU Kangtai, LANG Boyu, et al. Operating control strategy of advanced MMC based on fault-clearing special self-resistance module[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(5): 189-195.
 - [7] 年珩,孔亮. 直流微电网故障保护技术研究综述[J]. 高电压技术,2020,46(7):2241-2254.
NIAN Heng, KONG Liang. Review on fault protection technologies of DC microgrid[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(7): 2241-2254.
 - [8] DANTAS R, LIANG Jun, UGALDE-LOO C E, et al. Progressive fault isolation and grid restoration strategy for MTDC networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(2):909-918.
 - [9] XU Yuzhe, ZHANG Zheren, XU Zheng. Design and DC fault clearance of modified hybrid MMC with low proportion of full-bridge submodules[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2021, 15(15):2203-2214.
 - [10] 王金健,王志新. 一种具有限流能力的新型混合式高压直流断路器拓扑[J]. 电力自动化设备,2019,39(10):143-149.
WANG Jinjian, WANG Zhixin. A novel hybrid high-voltage DC circuit breaker topology with current limiting capability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(10): 143-149.
 - [11] 陆书豪,贾秀芳. LCC-FHMMC混合直流输电系统阀侧故障特性及保护策略[J]. 电力自动化设备,2021,41(11):211-216, 224.
LU Shuhao, JIA Xiufang. Grounding fault characteristics of converter valve-side and protection strategy in LCC-FHMMC hybrid DC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(11): 211-216, 224.
 - [12] SHANGGUAN Xin, QIN Wenping, WANG Cheng, et al. Protection scheme of multi-terminal flexible DC distribution network based on current-limiting inductor voltage[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 267(4):1-8.
 - [13] MEI Mingwan, WANG Ping, CHE Yanbo, et al. Hybrid DC circuit breaker with fault current suppression capability[J]. Journal of Power Electronics, 2021, 21(10):1-14.
 - [14] 张章,胡源,罗涛,等. 中压直流配电系统保护技术研究综述[J]. 电测与仪表,2020,57(23):109-118.
ZHANG Zhang, HU Yuan, LUO Tao, et al. Review on research of protection technology for medium voltage DC distribution system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(23): 109-118.
 - [15] 刘程卓,王渝红,龚鸿,等. 一种适用于混合式高压直流断路器负载换流开关的新型缓冲电路[J]. 电力自动化设备,2018,38(3):205-209, 217.
LIU Chengzhuo, WANG Yuhong, GONG Hong, et al. Dynamic assessment of power transformer status based on real-time monitoring and experimental data[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3): 205-209, 217.
 - [16] 李帅,赵成勇,许建中,等. 一种新型限流式高压直流断路器拓扑[J]. 电工技术学报,2017,32(17):102-110.
LI Shuai, ZHAO Chengyong, XU Jianzhong, et al. A new topology for current-limiting HVDC circuit breaker[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(17): 102-110.
 - [17] JOVCIC D, LIN Weixing, NGUEFEU S, et al. Low-energy protection system for DC grids based on full-bridge MMC converters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(4):1934-1943.
 - [18] 杨赛昭,向往,文劲宇. 基于限流电抗器电压差异性的架空柔直电网故障检测方法[J]. 中国电机工程学报,2020,40(4):1196-1211.
YANG Saizhao, XIANG Wang, WEN Jinyu. A fault protection scheme based on the difference of current-limiting reactor voltage for overhead MMC based DC grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(4): 1196-1211.
 - [19] 高飘,郑晓冬,晁晨棚,等. 基于边界暂态能量的多端柔性直流输电线路保护[J]. 电力系统自动化,2021,45(17):171-179.
GAO Piao, ZHENG Xiaodong, CHAO Chenxu, et al. Protection for multi-terminal flexible DC transmission lines based on boundary transient energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(17): 171-179.
 - [20] 朱思丞,赵成勇,许建中. 含多类型故障限流设备动作的直流电网保护时序配合[J]. 电力系统自动化,2019,43(21):195-202.
ZHU Sicheng, ZHAO Chengyong, XU Jianzhong. Time-sequence coordination of protection in DC grid with multi-type fault current limiting devices[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(21): 195-202.
 - [21] 赵坚鹏,赵成勇,许建中,等. 直流电网中超导限流器与高压直流断路器的协调配合方法[J]. 电力自动化设备,2018,38(11):121-128.
ZHAO Jianpeng, ZHAO Chengyong, XU Jianzhong, et al. Coordination between superconducting current limiter and high voltage DC circuit breaker in DC grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 121-128.
 - [22] 肖磊石,盛超,骆潘钊,等. 基于电阻型超导限流器的直流线路纵联保护方法[J]. 广东电力,2020,33(8):11-17.
XIAO Leishi, SHENG Chao, LUO Pandian, et al. Pilot protection method of DC line based on resistance superconducting fault current limiter[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(8): 11-17.
 - [23] 周光阳,李妍,何大瑞,等. 含限流器的多端柔直系统故障保护策略[J]. 电工技术学报,2020,35(7):1432-1443.
ZHOU Guangyang, LI Yan, HE Darui, et al. Protection scheme for VSC-MTDC system with fault current limiter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(7): 1432-1443.
 - [24] 谭翔宇,任丽,唐跃进,等. 饱和铁芯型超导限流器在柔直系统中的限流特性研究[J]. 电工技术学报,2020,35(增刊2):556-561.
TAN Xiangyu, REN Li, TANG Yuejin, et al. Study on the current-limiting characteristics of saturated iron core superconducting fault current limiter in MMC-HVDC system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(Supplement 2): 556-561.
 - [25] 高本锋,董沛毅,刘辛晔,等. 高压直流输电线路微分欠压保护特性与定值整定[J]. 电网技术,2015,39(8):2303-2311.
GAO Benfeng, DONG Peiyi, LIU Xinye, et al. Research of HVDC transmission line differential under-voltage protection characteristics and value setting[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2303-2311.
 - [26] 王聪博,贾科,赵其娟,等. 基于故障全电流相关性检验的柔性直流配电线路纵联保护[J]. 电工技术学报,2020,35(8):1764-1775.
WANG Congbo, JIA Ke, ZHAO Qijuan, et al. Pilot protection for flexible-DC distribution line based on correlation test of DC current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(8): 1764-1775.

作者简介:



郑 峰

郑 峰(1983—),男,副研究员,博士,主要研究方向为微电网运行与控制(E-mail: zf_whu@163.com);

张锦松(1998—),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统运行与规划(E-mail: 1079761308@qq.com);

林燕贞(1991—),女,工程师/技师,

硕士,主要研究方向为自动化(E-mail: 1505472990@qq.com);

陈志东(1987—),男,工程师/技师,硕士,主要研究方向为调度运行(E-mail: czd1103@foxmail.com);

张 军(1978—),男,工程师,主要研究方向为电力工程(E-mail: 610505016@qq.com)。

(编辑 任思思)

Fault isolation strategy for multi-terminal DC distribution network based on novel flexible fault current limiter

ZHENG Feng¹, ZHANG Jinsong¹, LIN Yanzhen², CHEN Zhidong³, ZHANG Jun⁴

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Fuzhou Power Supply Company, State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350000, China;

3. Lanzhou Power Supply Company, State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730050, China;

4. Shennongjia Power Supply Company, State Grid Hubei Electric Power Company, Shennongjia 442400, China)

Abstract: Aiming at the problems of high peak value of fault current, fast rising speed and unable to ensure the reliability of power supply in non-fault area in multi-terminal DC system, a fault isolation strategy based on the cooperation of a cascaded novel flexible current limiter and a mechanical DC circuit breaker is proposed, which is suitable for the medium and high voltage distribution network. Firstly, the flexible current limiter is triggered by differential undervoltage protection to achieve the effect of inter-pole voltage clamping, suppress the fault current and improve the dynamic recovery characteristics of DC system after fault isolation. Secondly, according to the breaking speed of DC circuit breaker, the action time of current limiter can be set flexibly. The directional pilot protection signal of the circuit breaker is used to ensure the continuous action of the current limiter at the converter station side in the fault area until the circuit breaker acts to isolate the fault. This strategy can also avoid the blocking of converter station, reduce the requirements of breaking speed and breaking capacity of circuit breaker, prolong the service life of circuit breaker and improve the reliability of system power supply. Finally, a four-terminal medium voltage distribution network model is built in MATLAB/Simulink, and the effect of current limiter and the feasibility of the proposed strategy are verified by simulation.

Key words: multi-terminal DC system; distribution network; flexible current limiter; DC circuit breaker; fault isolation strategy; power supply reliability

附录 A

表 A1 四端直流配电网系统参数

TableA1 System parameters of four-terminal DC distribution network

参数	换流站 1	换流站 2	换流站 3	换流站 4
换流站额定容量/ (MV·A)	10	10	10	10
直流电压/kV	±5	±5	±5	±5
直流侧电容值/mF	4	2	2	2
交流侧电抗值/mH	50	70	70	70
限流电感/mH	100×10	100×10	100×10	100×10
换流站出口平波电抗器/mH	20	20	20	20
控制方式	U_{dc} 、 Q	P 、 Q	P 、 Q	P 、 Q

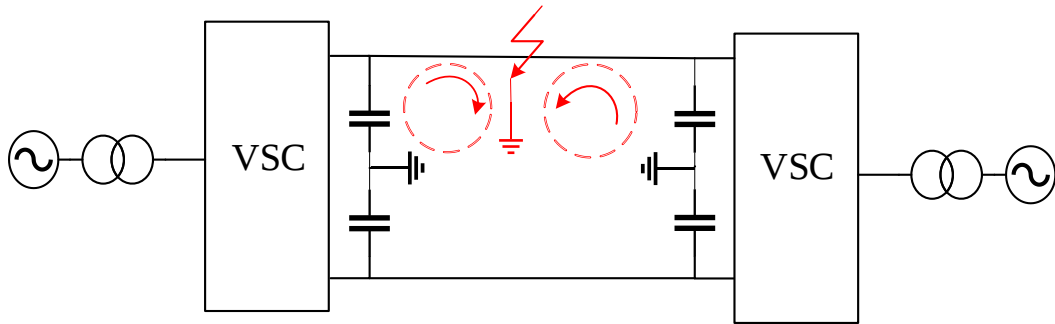


图 A1 单极接地故障回路

Fig.A1 Circuit of single-pole grounding fault

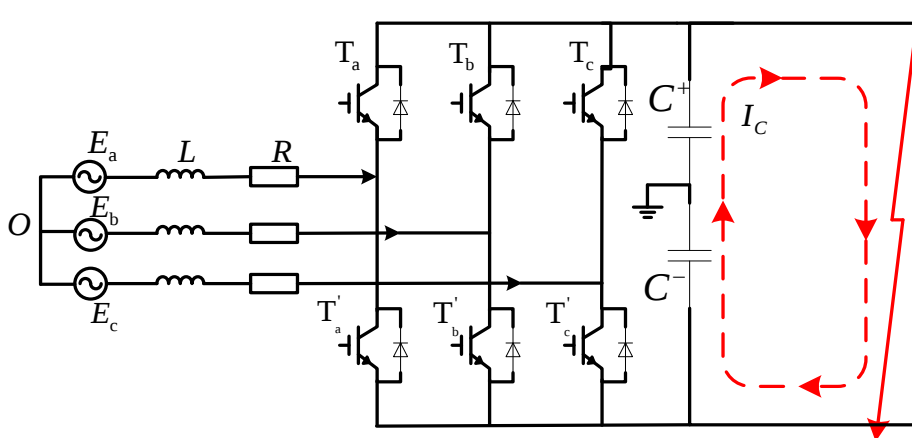


图 A2 极间短路故障回路

Fig.A2 Circuit of inter pole short circuit fault

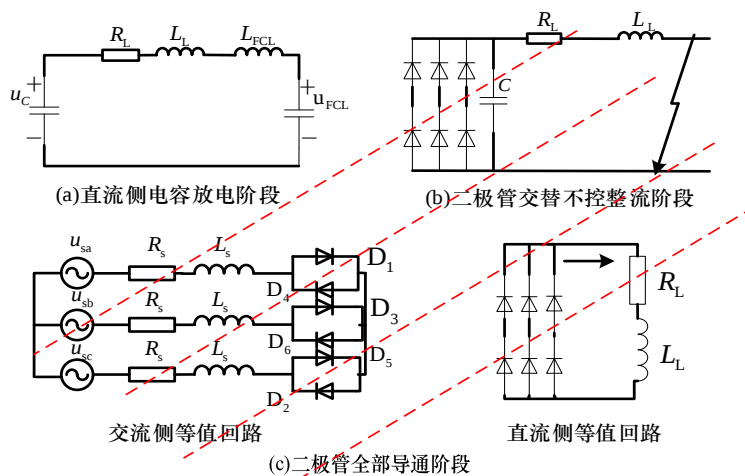
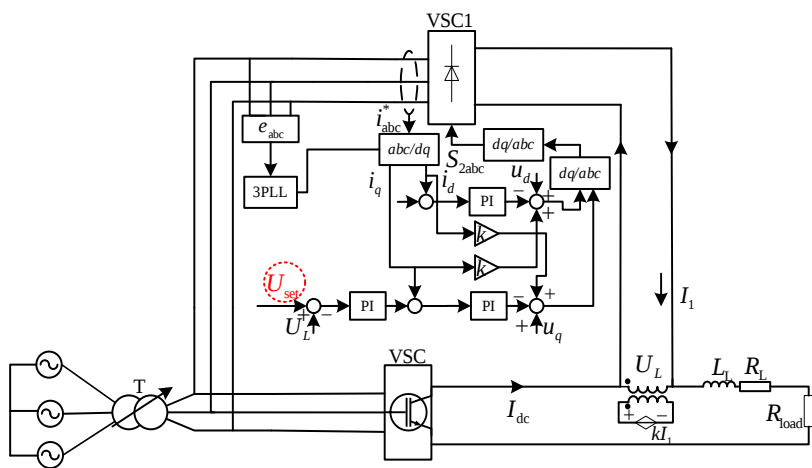
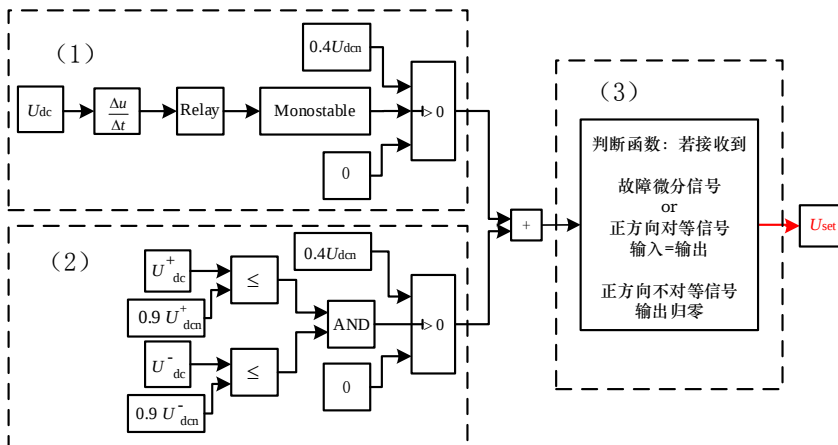


图 A3 极间短路故障暂态过程

Fig.A3 Transient process of inter pole short circuit fault



(a) 柔性故障限流器整流控制



(b) 故障限流器电压输入信号控制方式

图 A4 柔性故障限流器控制策略

Fig.A4 Control strategy of flexible fault current limiter

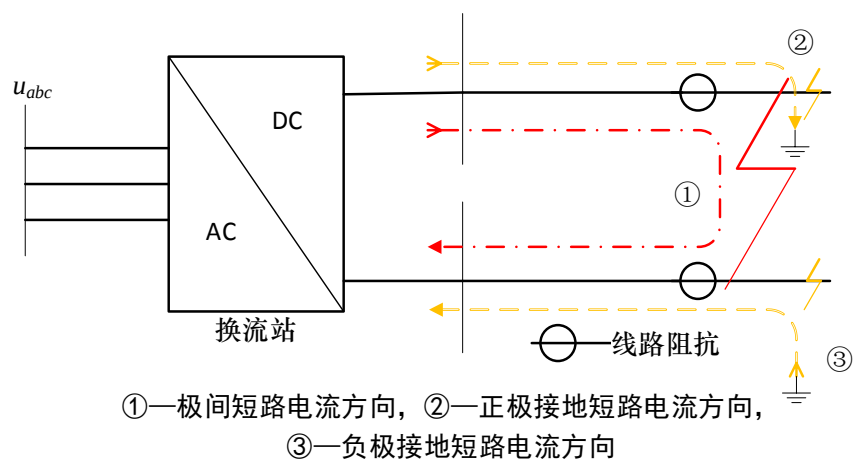


图 A5 直流故障电流方向

Fig.A5 DC fault current direction

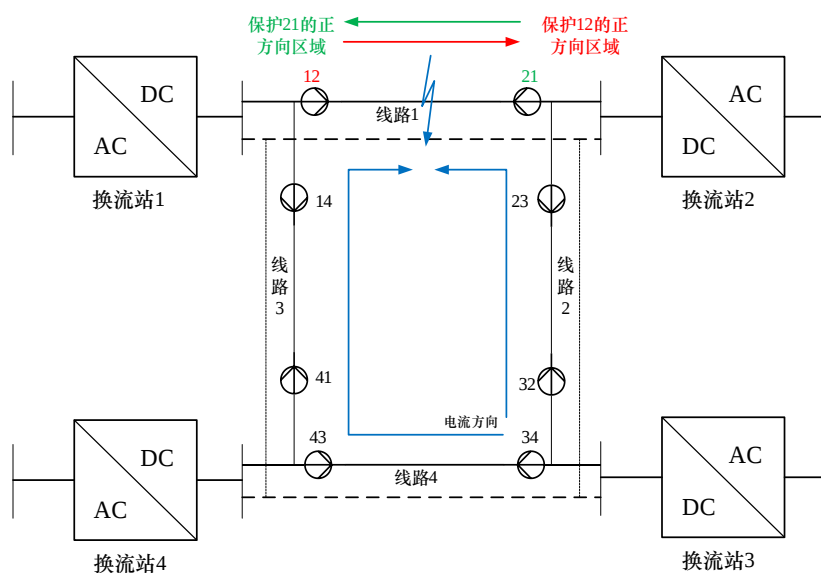


图 A6 直流侧区内外故障示意图

Fig.A6 Schematic diagram of internal and external faults at DC side

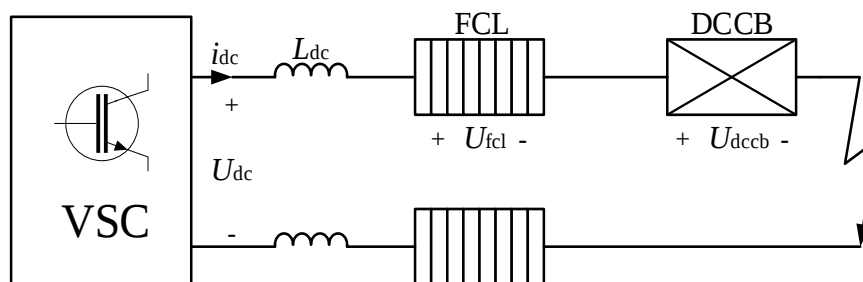


图 A7 单侧换流站配置接线

Fig.A7 Configuration wiring of single-side converter station

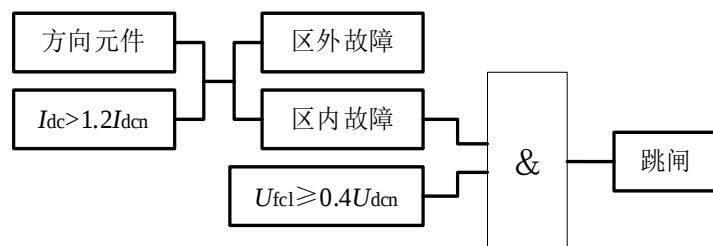


图 A8 直流断路器动作原理框图

Fig.A8 Operation principle block diagram of DC circuit breaker

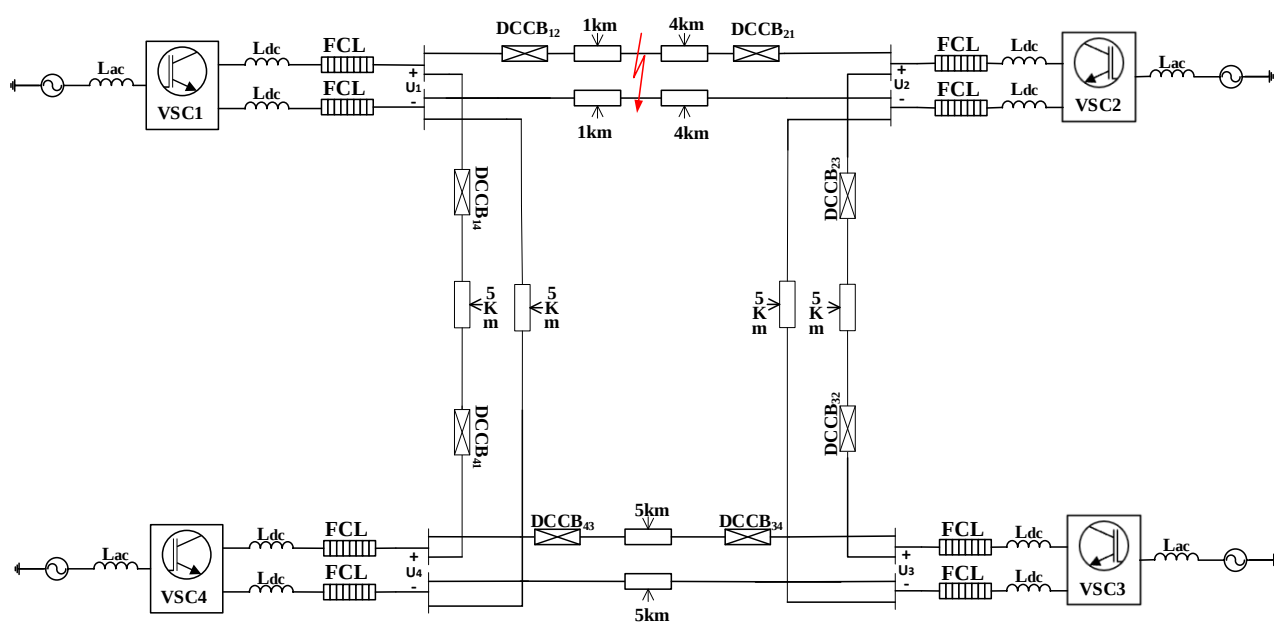


图 A9 四端直流配电网系统结构

Fig.A9 System structure of four-terminal DC distribution network

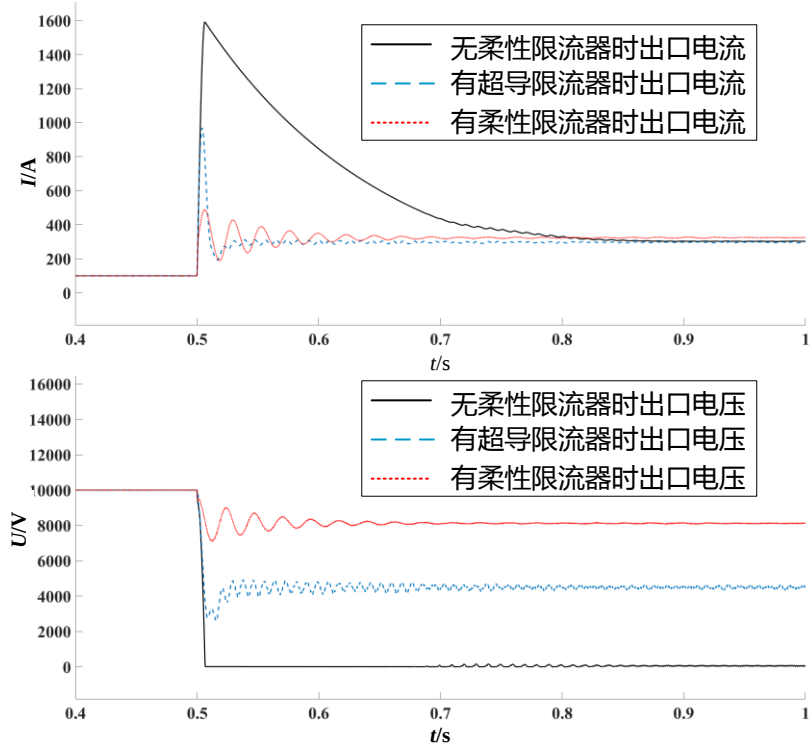


图 A10 不同条件下的出口电压、电流对比

Fig.A10 Comparison of voltage and current among different conditions

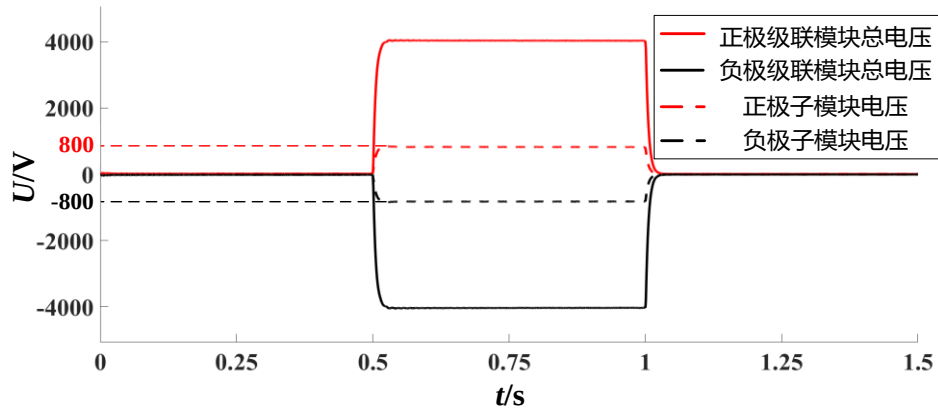


图 A11 柔性故障限流器两端电压

Fig.A11 Voltage across flexible fault current limiter

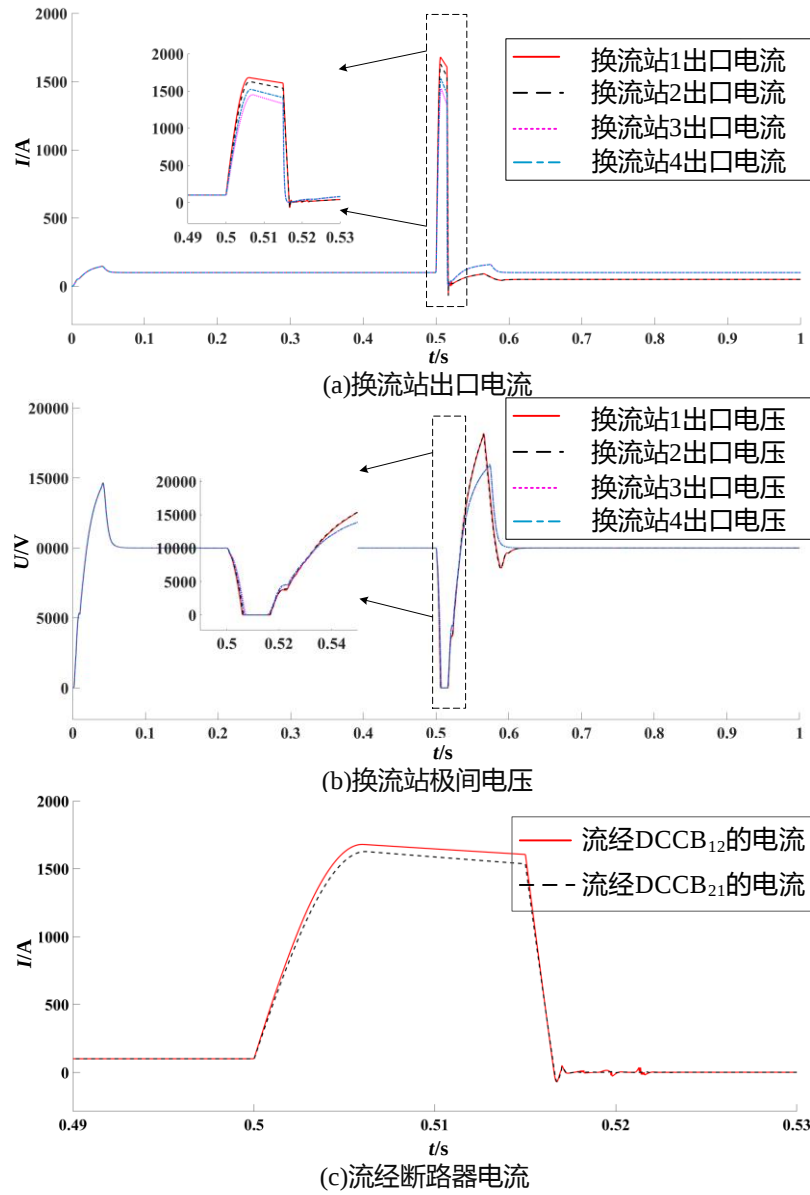


图 A12 仅含直流断路器的故障隔离策略结果

Fig.A12 Results of failure isolation strategy with only DCCB

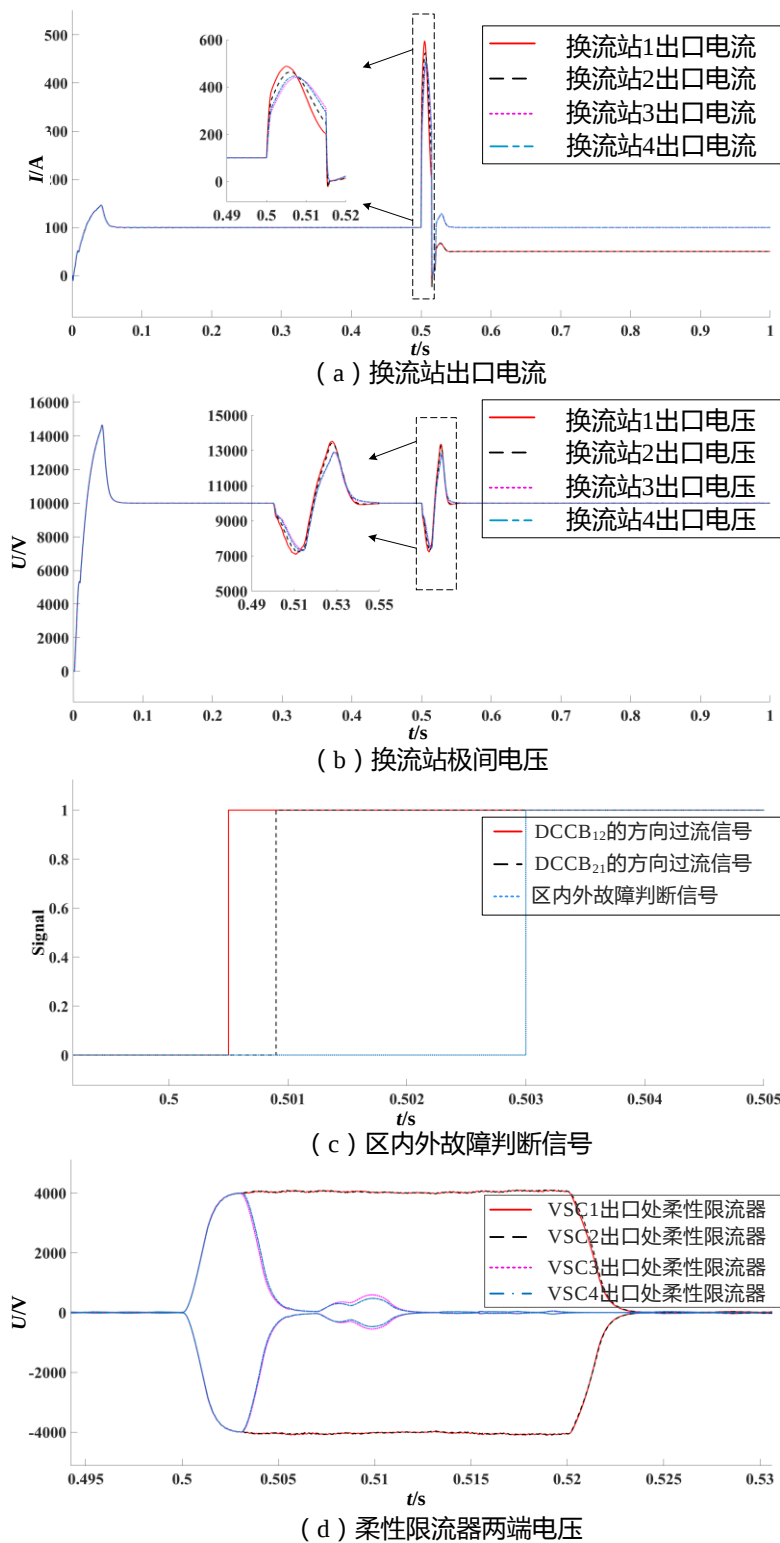


图 A13 短路故障下各端口参数

Fig.A13 Parameters of each port under short circuit fault