

# 基于模块化多电平换流器的高压直流系统直流侧故障限流技术研究

郝晓弘\*, 黄伟, 裴婷婷, 王锐, 邓福莉

(兰州理工大学电气工程与信息工程学院, 甘肃省 兰州市 730050)

## Research on Current Limiting Technology of DC-side Fault of High Voltage Direct Current System Based on Modular Multilevel Converter

HAO Xiaohong\*, HUANG Wei, PEI Tingting, WANG Rui, DENG Fuli

(School of Electrical Engineering and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu Province, China)

**Abstract:** With the rapid development of flexible high voltage direct current (HVDC) transmission technology based on modular multilevel converters, problems such as the limitation, and the difficulty of opening and closing of the DC-side short-circuit fault current have become research hotspots. The fault current limiting technology quickly limits the peak value, and rise rate of the DC fault current, thus providing powerful conditions for rapid isolation of the DC circuit breakers. In this paper, we proposed two technical schemes of fast fault current limiting, based on existing hybrid DC circuit breakers: a new DC fault limiter and DC circuit breaker matching scheme, and a hybrid DC circuit breaker scheme that combined a current limiting circuit. Through the current-limiting inductor, the rise rate of fault current could be suppressed at the initial stage of fault, and the current-limiting resistor and capacitor could be put into operation quickly during the fault, and then the inductor current-limiting circuit and capacitor discharge circuit could be introduced. It not only reduced the peak value of fault current, but also reduced the energy consumption pressure of the arrester in the DC circuit breaker. Moreover, the rapid breaking of the fault current on the DC-side was realized. Lastly, a PSCAD/EMTDC simulation was employed to verify the feasibility of the schemes. The results showed that the two proposed topology schemes could effectively reduce the fault current, the arrester energy consumption, and achieve breaking of DC circuit breaker reliability.

**Keywords:** HVDC transmission; modular multilevel converter; DC fault limiter; DC circuit breaker

**摘要:** 基于模块化多电平换流器的高压直流输电技术迅速发展, 直流侧短路故障电流的限制与开断困难等问题已然成为研究热点。故障限流技术能够快速限制短路电流的峰值与上升率, 为直流断路器的快速隔离提供有利条件。在现有混合式直流断路器基础上, 提出2种快速限流的技术方案: 新型直流故障限制器与直流断路器配合方案、结合限流电路的混合直流断路器方案。通过限流电感实现故障初期对故障电流上升率的抑制、限流电阻和电容在故障过程中快速投入以及电感限流回路与电容放电回路引入, 使得故障电流峰值降低, 直流断路器中避雷器的耗能压力继而减小, 最终实现直流侧故障电流的快速清除。最后, 利用PSCAD/EMTDC仿真验证方案的可行性。研究表明, 所提2种方案能够大幅度减小故障电流峰值、降低避雷器耗能以及实现直流断路器安全可靠分断。

**关键词:** 高压直流输电; 模块化多电平换流器; 直流故障限制器; 直流断路器

## 0 引言

基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的高压直流(high voltage direct current, HVDC)输电系统具有有功功率和无功功率可独立控制、无换相失败以及可向无源负荷供电等优点, 在清洁能源并网、海上平台供电等技术领域都有明显的优势<sup>[1-3]</sup>。然而, 柔性直流系统的“低惯量、弱阻尼”特性, 使其耐受直流故障的能力较差<sup>[4-5]</sup>, 故而

基金项目: 国家自然科学基金(51767017); 甘肃省科技计划资助项目(20JR10RA177)。

National Natural Science Foundation of China(51767017); The Science and Technology Plan of Gansu Province(20JR10RA177).

在实际工程中一般需采取故障电流限制措施来提高电力系统的安全可靠性。

故障电流限制器 (fault current limiter, FCL) 能够在识别直流侧短路故障后及时投入到限流过程中,一定程度上可减小故障电流峰值和上升率,提高直流电网故障保护系统的响应速度<sup>[6]</sup>,为直流断路器 (DC circuit breaker, DCCB) 限制直流故障电流提供辅助支撑<sup>[7]</sup>,增强隔离效果<sup>[8-9]</sup>。然而,当前高压大容量的直流断路器技术尚不成熟<sup>[10-11]</sup>。因此,发展直流限流技术具有重要意义。

目前,限流器主要分为两大类:超导限流器 (superconducting fault current limiter, SFCL)<sup>[12-13]</sup>和基于电力电子器件的固态限流器<sup>[14-15]</sup>。其中,超导限流器存在一些固有的缺陷,正常运行时需要配置大规模的冷却装置,投资成本高且占地面积大<sup>[16]</sup>。固态限流器得益于电力电子技术的发展,在实践中很快得到了应用<sup>[17]</sup>。文献[18]通过对ABB混合式直流断路器的开断原理和过程进行分析,研究了3种类型的限流器在不同直流电压等级和开断电流的要求下,对DCCB开断过程的影响,但未对该3种类型的FCL具体投入故障回路进行深入分析。文献[19]提出电容换相的电感型限流器,来实现电感的快速投切,且在换相后出现了电感与电容同时抑制故障电流的结果,但未能重点分析该过程。文献[20-21]分别提出了相应直流故障限制器的拓扑结构,它们采用的稳态通路均存在较大的电压和功率损失。文献[9]通过多端MMC-HVDC系统中增加电感的方法来实现直流侧故障电流的抑制,但没有对限流特性作出详细的分析。

综上所述,针对柔性直流系统直流侧故障电流限制与开断技术研究,设计一种新型直流限制器与混合DCCB配合或结合限流电路的混合DCCB具有重要的现实意义。本文基于ABB混合式DCCB提出了2种方案,并分别从拓扑结构、限流过程分析、可行性验证及方案对比等方面进一步研究,方案能够实现直流侧故障电流限制与DCCB可靠分断。

## 1 MMC故障特性分析及限流需求

### 1.1 闭锁前换流站过电流分析

换流站闭锁前,子模块电容放电是造成该阶段过电流的主要原因,相当于发生三相短路故障,电流快速上升,两站间的功率传输迅速停止。电容放电回路如图1所示。

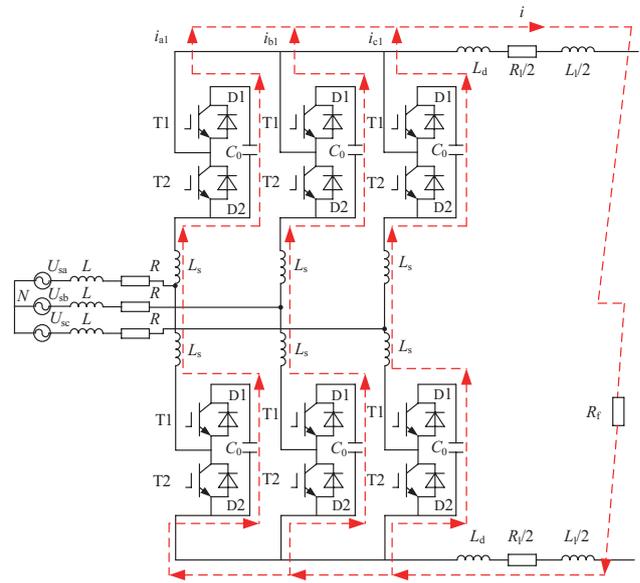


图1 换流站闭锁前故障电流路径

Fig. 1 Fault current path before converter station block

该阶段直流故障电流的等效放电回路 (不考虑交流侧电源馈流部分) 如图2所示。随着换流站子模块的投入和切除 (假设子模块个数为  $n$ ), 所有子模块中电容  $C_0$  均经放电回路放电, 上下桥臂电容相当于并联连接, 故等值电容  $C_{eq}$  是桥臂电容的2倍, 用  $2C_0/n$  表示; 阀电抗器  $L_s$  在放电回路中串联连接, 其等值电感  $L_{eq}$  是阀电抗器电感值的2倍, 用  $2L_s$  表示; 每相等值电阻为  $R_{eq}$ 。

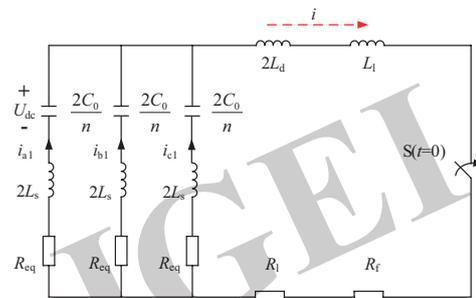


图2 电容放电回路等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of capacitor discharge circuit

在换流站子模块电容电压平衡控制作用下, 每一相等效参数  $C_{eq}$ 、 $L_{eq}$  和  $R_{eq}$  见附录A式 (A1)。电容放电回路进一步等效为RLC二阶电路, 见附录A图A1。

换流站闭锁前, 子模块电容的放电是一个振荡放电过程, 具体推导过程见附录A式 (A3) 一式 (A7)。最终可得直流侧发生双极短路故障时, 放电电流  $i$  为

$$i = e^{-\sigma t} \left[ \frac{C'}{L'} U_{dc}^2 + I_d^2 \right] \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{n}{(4L_s + 12L_d)C_0}} \quad (2)$$

放电电流峰值 $I_m$ 、放电电流达到峰值的时间 $t_m$ 见附录A式(A10)、式(A11)。

## 1.2 闭锁前后换流站过电流分析

当直流侧发生故障以后,换流站可能因桥臂快速过流使其所有子模块发生闭锁,从而进入子模块闭锁后阶段。在换流站闭锁后这一阶段,放电电流为桥臂电感的续流和交流系统对短路点的馈流。桥臂上电感所储存的能量在衰减至零之前,放电电流会持续存在,所以子模块中二极管不会关断。故要求DCCB能够在MMC发生过流导致闭锁前隔离故障。所以,本文主要研究换流站闭锁前这一阶段,闭锁后阶段将不作为本文研究的重点。

通过上述对直流故障电流的推导结论可知,直流故障电流上升速度主要取决于换流站闭锁前子模块电容放电电流,该过程中系统短路回路阻抗很小,若不采取限流措施,直流故障电流在短时间内将达到数十kA。电阻、电感和电容均能起到限制电流的作用,利用电阻能够快速消耗故障时的暂态能量,直流故障电流的大小与直流电抗器电感值呈负相关关系、与限流电容值呈正相关关系,综合考虑其抑制故障电流效果,提出可行性限流措施。

## 2 ABB混合式直流断路器故障开断原理

直流侧双极短路故障是对MMC-HVDC系统危害较为严重的故障类型,故障电流上升速度快,短時間幅值可以达到很高水平。ABB公司的混合式DCCB仅能切除故障线路,不具限流作用。

### 2.1 ABB混合式DCCB拓扑结构

ABB公司已经研发出的混合直流断路器<sup>[22-23]</sup>拓扑结构如图3虚线部分所示。

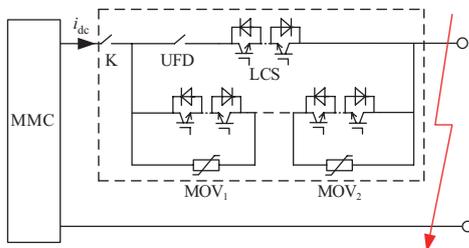


图3 ABB混合式DCCB结构图

Fig. 3 ABB hybrid DCCB structure diagram

其中,通流支路由超高速隔离开关(ultrafast disconnect, UFD)和辅助换流开关(load current switch, LCS)串联而成;K为机械开关;电流转移支路由 $n$ 个子模块(sub-module, SM)串联构成;耗能支路由金属氧化物避雷器(metal oxide varistor, MOV)构成。

### 2.2 ABB混合式DCCB故障开断仿真

本文利用PSCAD/EMTDC仿真软件,对图3所示的MMC模型进行仿真验证,其中MMC采用半桥型子模块,系统参数如表1所示。设置2.0 s时刻发生双极短路故障。

表1 两端仿真系统参数

Table 1 Simulation parameters of two-terminal system

参数	数值
额定直流电压 $U_{dc}/kV$	$\pm 640$
额定直流电流 $i_{dc}/kA$	1.5
子模块电容值 $C_{\phi}/\mu F$	2800
子模块个数 $n$	76
各桥臂电感 $L_s/mH$	50
平波电抗器 $L_d/mH$	100

从图4可看出,系统正常运行时,线路直流电流为1.5 kA,当故障电流越限20%时,DCCB开始动作,故障开断的短路电流峰值达到6.8 kA,电流上升率约为883 A/ms,经25.2 ms电流衰减至零。从图5可看出,DCCB两端端电压被限制在残压798 kV。短路电流在衰减的过程当中,从图6可看出,主避雷器耗能 $E_{MOV}=5.5 MJ$ ,系统能量几乎全被避雷器吸收。

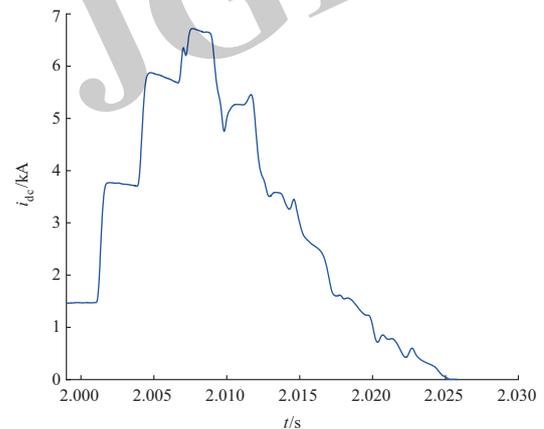


图4 ABB混合式DCCB开断电流波形

Fig. 4 Breaking current waveform of ABB hybrid DCCB

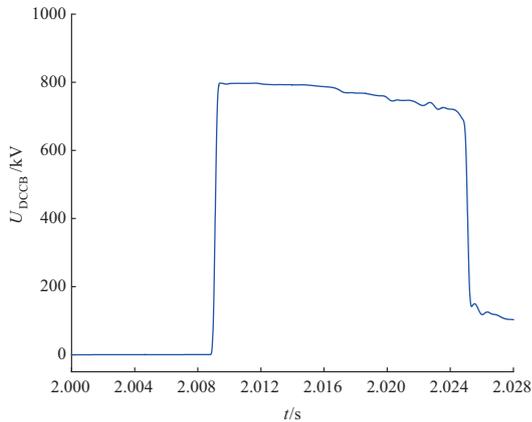


图5 ABB混合式DCCB开断电压波形

Fig. 5 Breaking voltage waveform of ABB hybrid DCCB

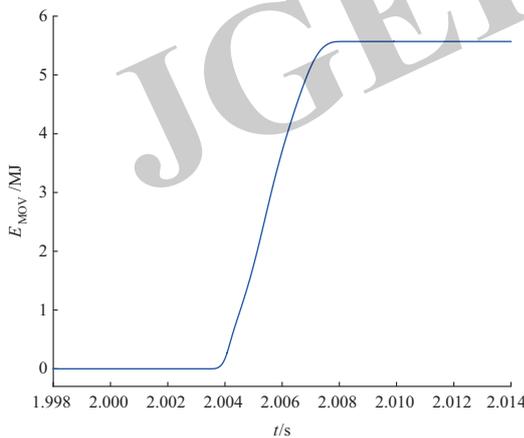


图6 ABB混合式DCCB避雷器耗能波形

Fig. 6 Arrester energy dissipation waveform of ABB hybrid DCCB

### 3 新型直流FCL与直流断路器协调配合

#### 3.1 新型直流FCL拓扑结构

本章提出一种新型直流FCL拓扑，配置在换流站直流侧出口处，可以起到限制故障电流的作用。图7展示了该新型直流FCL拓扑与ABB混合式DCCB的连接关系。

新型直流FCL由通流主支路和限流支路两部分构成，满足双向限流能力。其中，通流支路由 $L_1$ 、 $T_{1a}$ 、

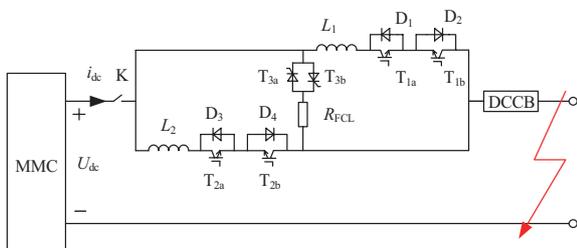


图7 新型直流FCL拓扑结构

Fig. 7 New DC FCL topology

$D_2$ 和 $L_2$ 、 $T_{2a}$ 、 $D_4$ 两部分并联组成稳态时的主电路；限流支路的组成包括：开关IGBT阀组 $T_3$ （ $T_{3a}$ 、 $T_{3b}$ ）及限流电阻 $R_{FCL}$ 构成，在故障时用来限制故障电流的峰值并加快耗散系统所储存的一部分能量；快速机械开关 $K$ 在稳态时闭合，故障时断开。

#### 3.2 限流过程机理及分析

设置MMC-HVDC直流系统正常运行时线路电流方向由左至右，双极短路故障发生在直流FCL右端。其中，换流站出口处直流母线电流记为 $i_{dc}$ ，直流系统电压记为 $U_{dc}$ ，IGBT阀组 $T_1$ 由 $T_{1a}$ 、 $T_{1b}$ 串联组成，IGBT阀组 $T_2$ 由 $T_{2a}$ 、 $T_{2b}$ 串联组成，晶闸管阀组 $T_3$ 由 $T_{3a}$ 、 $T_{3b}$ 反并联构成。下面以单端换流站为例分析。

1) 当系统正常运行时， $K$ 保持闭合状态，晶闸管阀组 $T_3$ 处于断开状态，且触发IGBT阀组 $T_1$ 、 $T_2$ 导通；DCCB内部UFD闭合，LCS模块导通。线路电流经过FCL通流主支路 $L_2$ 、 $T_{2a}$ 、 $D_4$ 和 $L_1$ 、 $T_{1a}$ 、 $D_2$ 两条路径及DCCB低损耗通流支路，电感 $L_1$ 、 $L_2$ 在直流系统处于稳态时相当于短路，此时直流电流并没有经过吸能电阻 $R_{FCL}$ ，FCL和DCCB通流支路产生的损耗非常小（可忽略不计），因此不影响系统的正常运行，该稳态过程电流流向如图8所示。

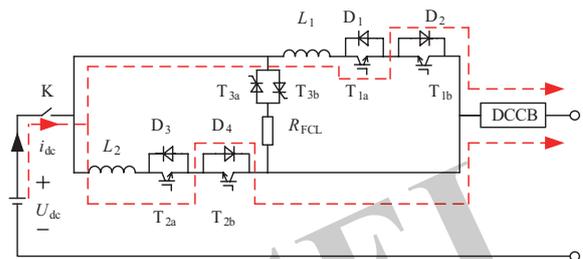


图8 新型直流FCL拓扑稳态电流流向

Fig. 8 Steady current direction of new DC FCL topology

简单来说，系统在正常运行下FCL呈现低阻态。即FCL等效电阻

$$R \approx 0 \quad (3)$$

2) 双极短路故障发生后，该过程电流流向如图9虚线所示。

故障发生后，FCL未投入系统前，因限流电感 $L_1$ 、 $L_2$ 的存在，故障初期短路电流的上升率得到有效抑制。FCL投入系统后，当故障电流达到设定阈值时，立即给IGBT阀组 $T_1$ 、 $T_2$ 触发信号，使其处于闭锁状态，且向 $T_3$ 触发导通信号、向DCCB发出分闸信号。此时，FCL中的 $L_1$ 和 $L_2$ 退出限流电路，限流电阻 $R_{FCL}$

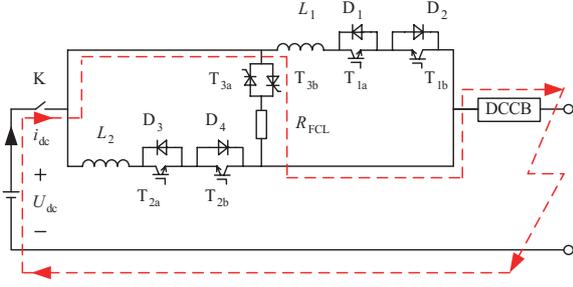


图9 新型直流FCL拓扑故障时电流流向

Fig. 9 Current direction at fault of new DC FCL topology

被串进故障回路中，避雷器随后也开始耗能。其中， $R_{FCL}$ 和避雷器会耗散故障时的暂态能量，进一步缩短了DCCB分断故障电流的时间，并抑制了故障电流的峰值。

系统在故障情况下FCL呈现高阻态。此时，FCL等效电阻

$$R \approx R_{FCL} \quad (4)$$

故障状态下FCL投入（限流电感退出回路）后的等效回路如图10所示。

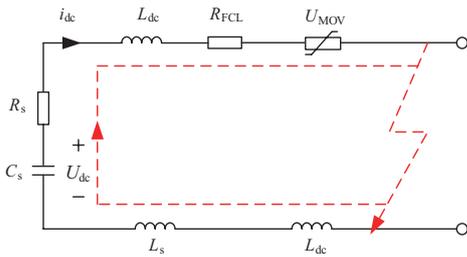


图10 新型FCL投入阶段的等效电路

Fig. 10 Equivalent circuit of new FCL at action stage

由基尔霍夫电压定律（Kirchhoff voltage law, KVL）得到等效电路的解析式为

$$U_{dc} = (L_s + 2L_{dc}) \frac{di_{dc}}{dt} + (R_s + R_{FCL}) i_{dc} + kU_{MOV} \quad (5)$$

式中： $U_{dc}$ 为直流电压； $L_s$ 为换流站等效电感； $L_{dc}$ 为换流站出口的平波电抗器； $R_s$ 为换流站等效电阻； $i_{dc}$ 为直流电流； $R_{FCL}$ 为FCL的吸能电阻； $kU_{MOV}$ 为DCCB中避雷器两端的近似电压，其中k为常数。

解出线路电流方程为

$$i_{dc} = \frac{U_{dc} - kU_{MOV}}{R_s + R_{FCL}} + e^{-\frac{R_s + R_{FCL} t}{L_s + 2L_{dc}}} + I_0 \quad (6)$$

式中： $I_0$ 为故障电流的最大峰值。

吸能电阻 $R_{FCL}$ 吸收的能量可以表示为

$$E_{R_{FCL}} = \int_{t'}^{t''} R_{FCL} i_{dc}^2 dt \quad (7)$$

式中： $t'$ 、 $t''$ 为故障过程的始末两个时刻。

故障时，FCL退出的限流电感 $L_1$ 、 $L_2$ 所暂时储存的这部分磁场能量不需要被断路器消耗。故，因限流器退出而减小的断路器耗能 $E_{save}$ 为

$$E_{save} = \frac{1}{2} \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2} i_{dc}^2 \quad (8)$$

由图10等效电路可以看出，系统能量由阻尼电阻和避雷器共同吸收，可表示为

$$E_{MOV} + E_{R_{FCL}} + E_{R_s} + \frac{1}{2} C_s U_{dc}^2 = E_{short} \quad (9)$$

式中： $E_{short}$ 为故障后短路回路所储存的能量。

3)最后，电流衰减至零，快速机械开关K断开，整个限流过程结束。此时，故障得到有效隔离。

### 3.3 开断仿真分析

为说明本章所提新型直流FCL拓扑的可行性与有效性，利用PSCAD/EMTDC仿真软件，基于图7所示的MMC模型进行仿真验证，系统参数如表1所示。设定限流参数：FCL中的限流电感 $L_1=L_2=0.12$  H，限流电阻 $R_{FCL}=260 \Omega$ 。设置2.0 s时刻发生双极短路故障。

由于增加了限流电路，故障电流在越限20%时，即2.001 6 s时刻DCCB接收到分闸指令，同时FCL投入；2.002 s时刻DCCB分断完成， $i_{dc}$ 的峰值立即减小，从图11中可以看到故障电流峰值达2.90 kA，电流上升率约为439 A/ms；2.006 s时刻故障电流下降至零。

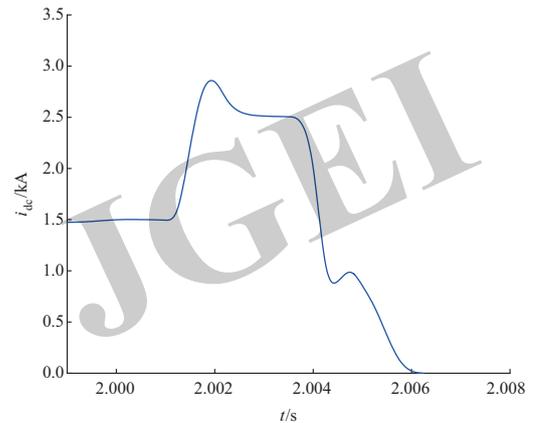


图11 新型直流FCL拓扑开断电流波形

Fig. 11 Breaking current waveform of new DC FCL topology

由图12可知，直流断路器开断电压为776 kV，起到更好的保护作用。

图13展示了能量耗散情况，其中限流电路中的吸能电阻耗散能量为3.78 MJ，DCCB中的主避雷器耗散能量为0.96 MJ。

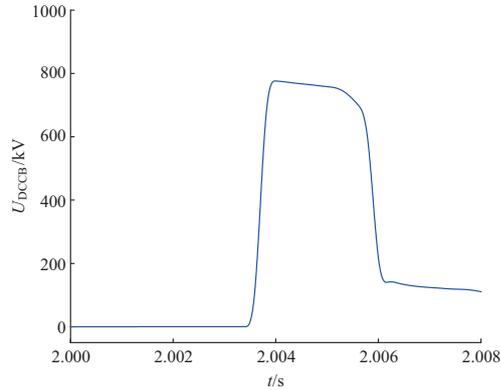


图 12 新型直流FCL拓扑开断电压波形

Fig. 12 Breaking voltage waveform of new DC FCL topology

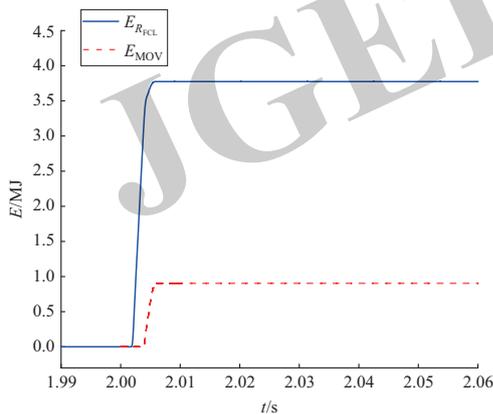


图 13 新型直流FCL拓扑能量耗散波形

Fig. 13 Energy dissipation waveform of new DC FCL topology

### 3.4 限流效果分析

为直观表明限流能力,将仅ABB混合式DCCB和增加新型FCL与其配合后的故障电流进行对比,如表2所示。因ABB混合式DCCB不含限流结构,所以故障电流峰值最大,故所提新型FCL与ABB混合式DCCB配合后,故障电流的峰值下降了57.4%,电流的上升率降低约50.3%,且故障电流衰减至过零点的时间缩短了19.2 ms。

表2也展现了增加新型FCL前后,DCCB中避雷器及限流电路中吸能电阻能量耗散具体情况。在短路故障发生后,FCL动作前,限流电感 $L_1$ 、 $L_2$ 相当于短路存在于电路中,当故障电流达到设定阈值时,FCL动作,立即给IGBT阀组 $T_1$ 、 $T_2$ 触发闭锁信号,在闭锁延迟的这段时间内限流电感进行了短暂的储能,如式(8)所示;随后,限流电感由稳态时的并联,变为故障后的退出回路,使得这部分能量不被DCCB消耗;其次,一部分能量被限流电阻耗散,线路电流衰减至零的时间缩短,直流侧提供的能量降低,故而避雷器

表 2 ABB混合式DCCB与DCCB配合新型直流FCL的限流能力对比分析

Table 2 Comparative analysis of current limiting capability of ABB hybrid DCCB and DCCB matching new DC FCL

参数	仅ABB混合式 CCB	DCCB与FCL配合
电流峰值 $i_{dcm}/kA$	6.8	2.9
电流上升率 $(A \cdot ms^{-1})$	883	439
过零点时间/ms	25.2	6.0
主避雷器耗散能量 $E_{MOV}/MJ$	5.5	0.96
吸能电阻耗散能量 $E_{RFCL}/MJ$		3.78

吸收能量显著降低。从表2可看到,避雷器吸收能量由5.5 MJ降为0.96 MJ,吸能电阻耗散能量为3.78 MJ,总吸能由5.5 MJ降低至4.74 MJ,有效减小了开断故障电流对避雷器的压力。

通过上述对比分析可知,本章所提新型FCL与DCCB配合的方案能在很大程度上减少DCCB的设计成本,提高DCCB的分断可靠性。

## 4 结合限流电路的混合直流断路器

### 4.1 结合限流电路的混合DCCB拓扑结构

通常来说DCCB仅具备故障隔离作用,不具备限流能力,结合限流电路的DCCB恰好弥补了这一问题。本章在ABB公司已经研发出的混合DCCB的基础上,提出一种结合限流电路的混合DCCB拓扑(如图14所示),配置在换流站直流侧出口处。其拓扑结构除了由低损耗通流主支路、电流转移支路及耗能支路三部分并联而成外,还引入了电感限流回路、电容放电回路及电阻-电容缓冲支路,从而达到快速切除直流故障的目的。

低损耗通流主支路由辅助换流开关LCS、超高速

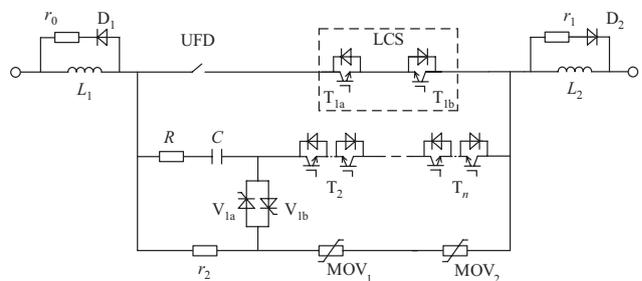


图 14 结合限流电路的混合DCCB拓扑

Fig. 14 Topology of hybrid DCCB with current limiting circuit

隔离开关UFD及电感限流回路三部分组成。在限流电感两端并联反向二极管和吸能电阻构成限流回路, 起加快衰减故障电流的作用。

电流转移支路由由 $n$ 个子模块串联构成的基础上, 引入了由耗能电阻 $R$ 和限流电容 $C$ 串联构成的缓冲支路。因转移支路IGBT的瞬时过流能力有限且较大的过电流会对其造成冲击, 所以引入了缓冲支路。限流电容 $C$ 与电阻 $R$ 、 $r_2$ 构成放电回路。

耗能支路由金属氧化物避雷器构成。

## 4.2 动作过程理论分析

双极短路故障发生在DCCB右端, 假设该过程线路电流从左至右流入。其中, 换流站出口处直流母线电流记为 $i$ , 直流系统电压记为 $U_{dc}$ , LCS由 $T_{1a}$ 、 $T_{1b}$ 串联组成, 晶闸管阀组 $V_1$ 由 $V_{1a}$ 、 $V_{1b}$ 反并联构成。下面以单端换流站为例分析。

当系统正常运行时, UFD保持闭合状态, LCS处于导通状态, 电流流经低损耗通流支路, 限流电感 $L_1$ 、 $L_2$ 对于系统稳态时相当于短路, 故而通流支路产生的损耗非常小(可忽略不计), 因此不影响系统的正常运行, 该稳态过程电流流向如图15所示。

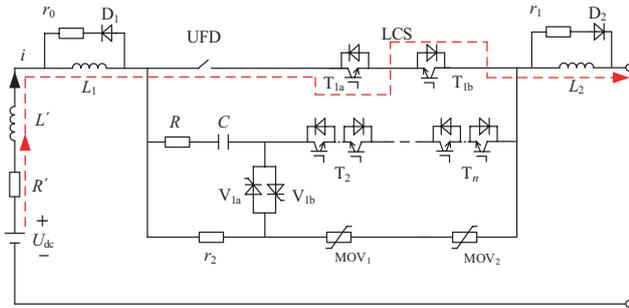


图15 结合限流电路的混合DCCB稳态电流流向

Fig. 15 Steady current direction of hybrid DCCB with current limiting circuit

$t_0$ 时刻发生双极短路故障, 此后断路器动作过程如下。

1)  $t_0$ 时刻故障发生后, 电流迅速上升, 此时故障电流继续流经低损耗通流主支路, 限流电感在故障初期抑制直流短路电流的上升率。故障初期直流侧等效电路如图16所示, 该阶段电感 $L$  (此处 $L$ 为 $L_1$ 、 $L_2$ 的等效电感) 和 $L'$ 起到抑制故障电流的作用, 由KVL可得表达式见附录B式 (B1), 整理后得式 (10)。

$$(L' + L)C_s \frac{d^2 i_1(t)}{dt^2} + R'C_s \frac{di_1(t)}{dt} + i_1(t) = 0 \quad (10)$$

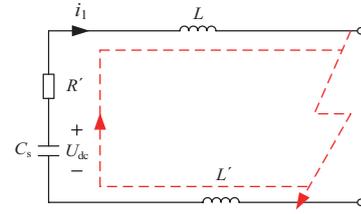


图16 结合限流电路的混合DCCB故障初期直流侧等效电路

Fig. 16 DC side equivalent circuit of hybrid DCCB with current limiting circuit at the beginning of fault

记 $L' + L = L''$ , 则式 (10) 整理后得

$$L''C_s \frac{d^2 i_1(t)}{dt^2} + R'C_s \frac{di_1(t)}{dt} + i_1(t) = 0 \quad (11)$$

$$\lambda'_{1,2} = -\frac{R'}{2L''} \pm \sqrt{\left(\frac{R'}{2L''}\right)^2 - \frac{1}{L''C_s}} \quad (12)$$

假设该阶段故障瞬间初始条件为 $U_{dc}(t_0) = U_0$ ,  $i_1(t_0) = I_0$ , 得到故障初期电流 $i_1$ 表达式为

$$i_1(t) = A \sqrt{\frac{L''}{C_s}} e^{-\sigma t} \sin(\omega'' t + \theta) \quad (13)$$

式中:  $A$ 、 $\theta$ 、 $\sigma$ 及 $\omega''$ 的表达见附录A式 (A12)。

2)  $t_1$ 时刻, 装置检测到短路电流超过动作设定值, 低损耗通流支路和电流转移支路分别闭锁和导通; 关断LCS模块, 并且给UFD发出分闸指令, 使其完成触头的分断。此时, 故障电流将流过缓冲支路及 $T_2, \dots, T_n$ 构成的电流转移支路。

3)  $t_2$ 时刻, 故障电流完全转移到电流转移支路, 如图17所示。电流流过限流电容 $C$ 进行充电, 电阻 $r_1$ 、 $R$ 耗散系统中的一部分能量, 从而减少了避雷器需耗散的能量。

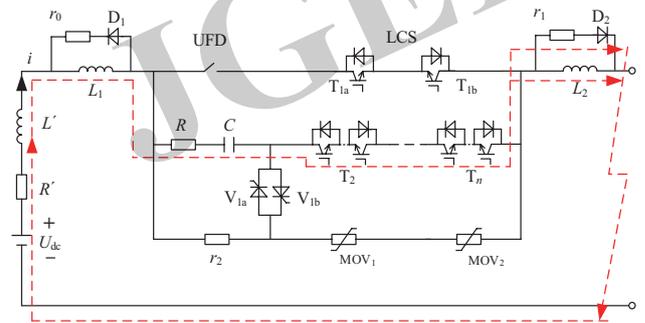


图17 结合限流电路的混合DCCB转移支路电流路径

Fig. 17 Transfer branch current path of hybrid DCCB with current limiting circuit

这一阶段, 故障电流流过限流电容和吸能电阻串联的缓冲支路, 电流完全转移至电流转移支路的等

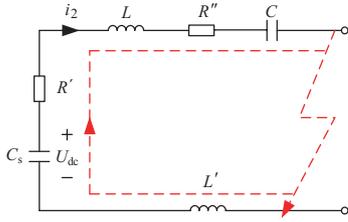


图 18 结合限流电路的混合DCCB转移支路电流等效电路

Fig. 18 Transfer branch current equivalent circuit of hybrid DCCB with current limiting circuit

效电路如图18所示。该阶段 $R''$ 为 $R$ 、 $r_1$ 的等效电阻， $L$ 为 $L_1$ 、 $L_2$ 的等效电感。由KVL可得表达式见附录B式(B2)，整理后得式(14)。

$$(L'+L)\frac{d^2i_2(t)}{dt^2}+(R'+R'')C_s\frac{di_2(t)}{dt}+\frac{C+C_s}{CC_s}i_2(t)=0 \quad (14)$$

该过程中，电容 $C$ 进行储能、电感 $L$ 储存的磁场能量可以分别表示为 $E_C$ 和 $E_L$ ，电阻 $R$ 吸能为 $E_R$ ：

$$\begin{cases} E_C = \frac{1}{2}C(U_{dc(t_2)}^2 - U_{dc(t_3)}^2) \\ E_L = \frac{1}{2}L(i_{dc(t_2)}^2 - i_{dc(t_3)}^2) \\ E_R = \int_{t_2}^{t_3} Ri_{dc}^2 dt \end{cases} \quad (15)$$

4)  $t_3$ 时刻，闭锁转移支路中的IGBT，晶闸管阀组 $V_{1a}$ 、 $V_{1b}$ 处于导通状态，故障电流流向耗能支路避雷器组，直至故障切除，如图19中红色虚线所示；同时，限流回路中的 $r_0$ 耗散电感 $L_1$ 所储存的能量，限流电容 $C$ 经耗能电阻构成回路进行放电，如图19中蓝色虚线所示。

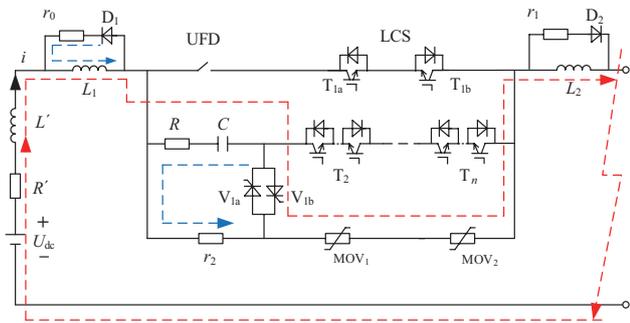


图 19 结合限流电路的混合DCCB故障电流能量耗散回路

Fig. 19 Fault current energy dissipation loop of hybrid DCCB with current limiting circuit

这一阶段，故障电流流经耗能支路避雷器，未流向 $r_1$ 支路，其等效电路如图20所示。由回路方程可得式(16)，整理后得式(17)。

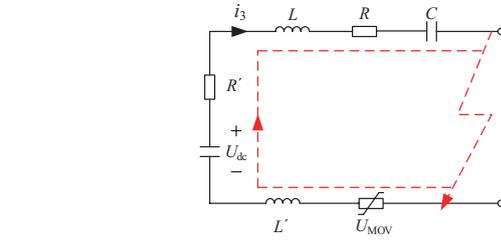


图 20 结合限流电路的混合DCCB MOV投入能量耗散等效电路

Fig. 20 MOV energy dissipation equivalent circuit of hybrid DCCB with current limiting circuit

$$U_{dc} = (R'+R)i_3(t) + U_{L'}(t) + U_L(t) + U_C + kU_{MOV} \quad (16)$$

$$(L+L')\frac{di_3(t)}{dt} + (R+R')i_3(t) = U_{dc}(t) - U_C(t) - kU_{MOV} \quad (17)$$

式中： $i_3(t)$ 、 $U_{L'}(t)$ 、 $U_L(t)$ 及 $U_C$ 与 $U_{dc}$ 的表达见附录A式(A13)。 $kU_{MOV}$ 为DCCB中避雷器MOV两端的近似电压，其中 $k$ 为常数。

在该过程中，电感限流回路中的电阻 $r_1$ 会吸收限流电感存储的一部分能量；耗能支路避雷器投入后，要吸收系统能量及感性元件所存储的剩余能量。换言之，该过程内储能元件损失的能量等于耗能元件（电阻和避雷器）吸收的能量，限流电容所构成的回路通过电阻 $R$ 和 $r_2$ 实现放电过程。

5)  $t_4$ 时刻，故障电流能量通过电感限流回路、电阻-电容缓冲支路、限流电容放电回路及耗能支路避雷器组完全耗散。当流经晶闸管阀组 $V_{1a}$ 、 $V_{1b}$ 的电流为零时， $V_{1a}$ 、 $V_{1b}$ 自动断开，该断路器的动作过程完成，即故障隔离过程结束。

### 4.3 开断仿真分析

为说明本章所提结合限流电路的混合DCCB拓扑的有效性可行性，通过PSCAD/EMTDC仿真软件，基于图21所示的模型对其进行仿真验证，系统参数如表1所示。设定限流参数：限流电感 $L_1=L_2=0.03$  H，限流电阻 $R=120$   $\Omega$ ， $r_0=r_1=30$   $\Omega$ ， $r_2=40$   $\Omega$ 。设置2.0 s时刻发生双极短路故障。

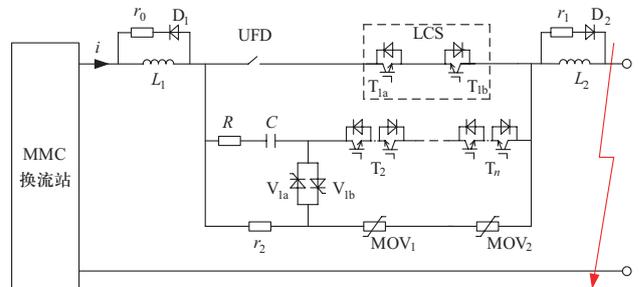


图 21 结合限流电路的混合DCCB仿真结构图

Fig. 21 Simulation structure of hybrid DCCB with current limiting circuit

故障电流越限20%时, 即2.001 8 s时刻DCCB接收到动作指令, 限流电路投入; 2.002 s时刻DCCB分断完成; 2.006 2 s时刻故障电流下降至零。

从图22可看到故障电流的峰值达2.85 kA, 电流的上升率约为613 A/ms, 经6.2 ms到过零点; 故障电流在整个衰减的过程当中始终低于3 kA。

由图23可知, 直流断路器开断电压为782 kV, 低于残压800 kV。

限流电容电压如图24所示, 其逐渐增大, 弥补了电抗器电压的衰减量, 保证了故障回路的电压支撑。此外, 电容所储存的能量, 通过其放电回路被电阻 $R$ 和 $r_2$ 耗散, 不会加剧故障电流, 有利于缩短故障切除的时间。

图25为所提混合DCCB拓扑结构中器件两端端电压。可看出, 晶闸管组 $T_1$ 承受的电压峰值为586 kV, LCS中晶闸管组 $V_1$ 承受的电压峰值为398 kV。图26为

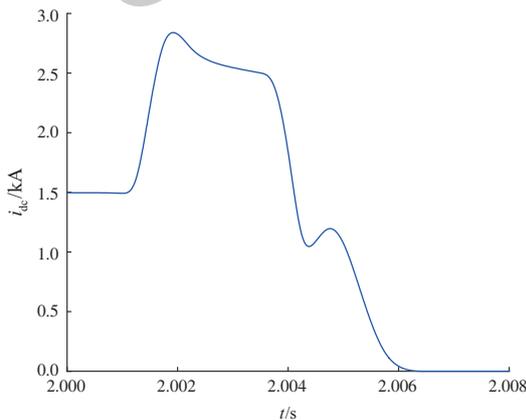


图 22 结合限流电路的混合DCCB开断电流波形

Fig. 22 Breaking current waveform of hybrid DCCB with current limiting circuit

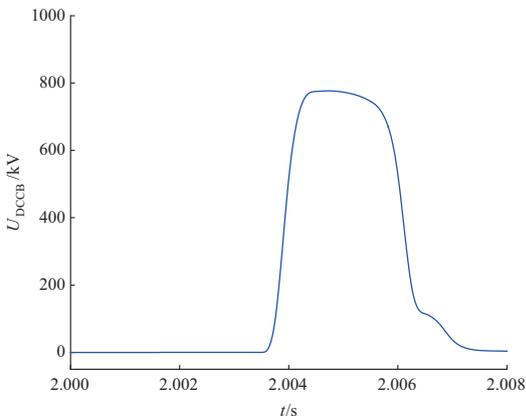


图 23 结合限流电路的混合DCCB开断电压波形

Fig. 23 Breaking voltage waveform of hybrid DCCB with current limiting circuit

拓扑结构中避雷器与限流电阻能量耗散的情况, 其中主避雷器耗能为2.32 MJ, 限流电阻 $R$ 耗能1.80 MJ, 电阻 $r_1$ 、 $r_2$ 耗散能量分别为0.36 MJ、0.30 MJ。

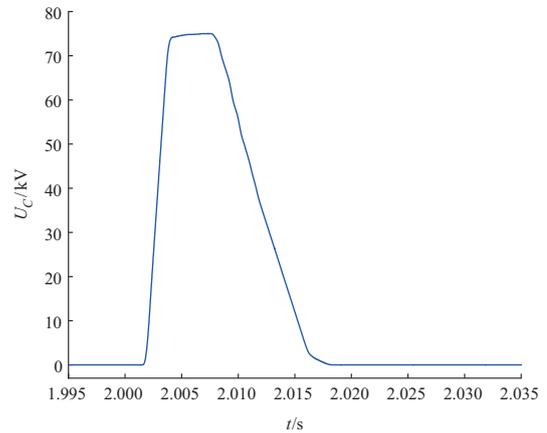


图 24 结合限流电路的混合DCCB限流电容电压

Fig. 24 Current limiting capacitor voltage of hybrid DCCB with current limiting circuit

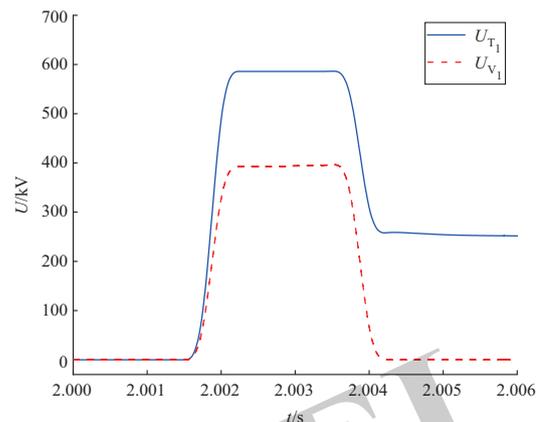
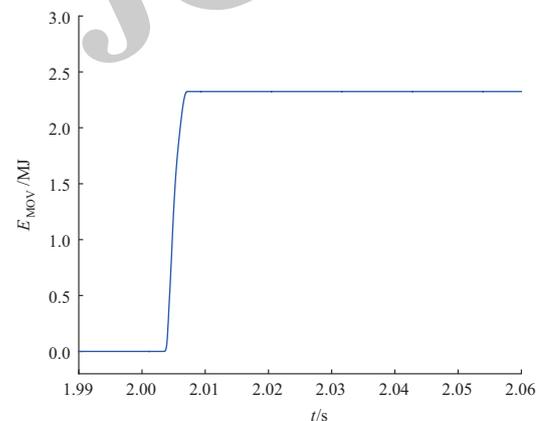
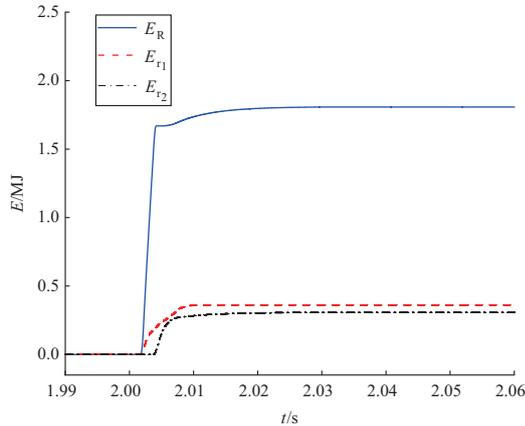


图 25 结合限流电路的混合DCCB器件电压波形

Fig. 25 Devices voltage waveform of hybrid DCCB with current limiting circuit



(a) 避雷器耗能波形



(b) 限流电阻耗能波形

图 26 结合限流电路的混合DCCB耗能波形

Fig. 26 Energy dissipation waveform of hybrid DCCB with current limiting circuit

#### 4.4 限流效果分析

为了直观表明限流能力, 将仅ABB混合式DCCB和结合限流电路的混合DCCB的故障电流进行对比, 如表3所示。

表 3 ABB混合式DCCB与结合限流电路的混合DCCB限流能力对比分析

Table 3 Contrastive analysis of current limiting capacity of ABB hybrid DCCB and hybrid DCCB with current limiting circuit

参数	ABB混合式DCCB	结合限流电路的混合DCCB
电流峰值 $i_{dmax}/kA$	6.8	2.85
电流上升率 $(A \cdot ms^{-1})$	883	613
过零点时间/ms	25.2	6.2
主避雷器耗散能量 $E_{MOV}/MJ$	5.5	2.32
限流电阻 $R$ 耗散能量 $E_R/MJ$		1.80
电阻 $r_0$ 、 $r_1$ 耗散能量 $E_{r0}$ 、 $E_{r1}/MJ$		0.36
电阻 $r_2$ 耗散能量 $E_{r2}/MJ$		0.30

本章所提结合限流电路的混合DCCB, 较仅ABB混合式DCCB, 故障电流的峰值下降约58.1%, 电流的上升率降低约30.6%, 且故障电流衰减至过零点的时间缩短了19 ms。

在故障初期, 限流电感所储存的一部分能量会被电感限流回路中的电阻耗散, 其大小为 $E_{r0}$ 、 $E_{r1}$ 。其次,

故障电流流经转移支路时, 会流过该支路的限流电阻 $R$ 和电容 $C$ , 限流电阻会耗散该支路故障电流的一部分能量。同时, 限流电容参与了该支路的储能过程, 这样能够减小对转移支路IGBT的电流冲击。最后, 限流电容储存的能量通过其引入的电容-电阻回路进行放电。因此, 避雷器吸收能量显著降低。

通过上述对比分析, 验证了本章提出的结合限流电路的混合DCCB方案能够有效地限制故障电流并降低避雷器耗能。

## 5 限流方案对比分析

针对直流侧故障电流的限制措施, 将仅ABB混合式DCCB传统方案(方案1)、本文第3章所提新型FCL与ABB混合式DCCB配合方案(方案2)及第4章所提结合限流电路的混合DCCB方案(方案3)进行对比, 分析其限流能力、经济性及适用场合三个方面。

### 5.1 限流能力

通过对3种方案进行对比分析, 其限流能力比较如表4所示。

表 4 3种方案限流能力对比分析

Table 4 Contrastive analysis of current limiting capacity of three schemes

参数	方案1	方案2	方案3
电流峰值 $i_{dmax}/kA$	6.8	2.9	2.85
电流上升率 $(A \cdot ms^{-1})$	883	439	613
过零点时间/ms	25.2	6.0	6.2
主避雷器耗散能量 $E_{MOV}/MJ$	5.5	0.96	2.32
限流电阻 $R$ 耗散能量 $E_R/MJ$		3.78	1.80
电阻 $r_1$ 耗散能量 $E_{r1}/MJ$			0.36
电阻 $r_2$ 耗散能量 $E_{r2}/MJ$			0.30

其中, 方案1对故障电流可独立完成故障切除, 但不具有限制电流作用。方案2提出的新型直流FCL对故障电流仅具有限制作用, 无法独立完成故障清除, 需要配合DCCB切断故障线路。方案3将限流电路集成到DCCB中, 不但具有限制电流作用, 而且能够及时切除故障。本文所提2种方案对故障电流均具有良好的限制效果。

## 5.2 经济性

相较于传统方案1, 加装方案2中的FCL或方案3中的限流电路, 将使直流断路器的开断电流降低到一定水平, 大幅降低断路器的制造难度和造价。

从本文所提2种方案拓扑结构来看: 首先, 新型FCL与ABB混合式DCCB配合的方案2, 未共用低损耗通流支路, 而方案3共用低损耗通流支路, 故方案3较方案2减少了LCS中相应的器件数量; 其次, 方案3较方案2少用一组双向开关阀组 $T_{2a}$ 、 $T_{2b}$ ; 最后, 方案3虽然在换流支路增加了限流电阻、电容, 但其造价相对较低。因此, 单纯从器件使用数量及造价上考虑, 方案3具备经济性优势。

## 5.3 适用场合

通过本文所提2种方案与传统方案1对比分析可知, 方案2适用于已经投入使用的柔性直流输电工程, 随着柔性直流输电电压等级与故障电流的不断提高, 只需在已投运柔性直流输电工程的DCCB端考虑添加方案2中的新型FCL, 就能够提高DCCB所承受的开断电流应力, 减少该实际输电工程中对DCCB的更换成本。方案3更加适用于还未投入使用的柔性直流输电工程, 或因直流电网的实际需要对DCCB进行更新换代, 方案3作为一条可行的技术途径, 不仅可靠性高, 而且还可以节约成本, 具有一定经济性优势。

## 6 结论

针对柔性直流输电系统直流故障电流发展速度快、开断困难的现状, 本文在已有混合直流断路器的基础上, 提出了新型直流FCL与直流断路器协调配合、结合限流电路的混合直流断路器2种可行性方案。利用PSCAD/EMTDC仿真软件建模, 验证了所提方案的可行性与有效性。主要结论如下。

1) 新型直流FCL与直流断路器协调配合中的新型FCL, 其通流主支路采用IGBT阀组, 限流支路采用晶闸管阀组; 结合限流电路的混合直流断路器中的限流电路与直流断路器共用通流支路, 较为节省成本。

2) 新型直流FCL与直流断路器协调配合相较传统方案, 直流故障电流峰值降低了57.4%, 电流上升率降低了50.3%, 且故障电流衰减至过零点的时间缩短至6 ms, 进一步降低了避雷器残压。结合限流电路的混合直流断路器相较传统方案, 其故障电流峰值降

低58.1%, 电流上升率降低了30.6%, 同时故障电流衰减至过零点的时间缩短至6.2 ms, 从而达到快速切除直流故障的目的。

3) 在配合直流断路器工作时, 本文提出的2种方案均能够显著降低避雷器耗能, 同时也可以有效降低故障电流对避雷器的压力, 具备可靠性优势。

4) 本文所提2种方案的拓扑结构简单, 通过对限流能力、经济性及适用场合三方面对比分析可知, 2种方案各具优点, 均有明显的工程应用价值和现实意义。

## 参考文献

- [1] 吴林林, 孙雅旻, 刘海涛, 等. 经柔性直流并网的大规模新能源集群有功控制技术[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(2): 125-131.  
WU Linlin, SUN Yamin, LIU Haitao, et al. Active power control technology of large-scale renewable energy cluster integrated by VSC-HVDC[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(2): 125-131(in Chinese).
- [2] 杜晓磊, 郭庆雷, 吴延坤, 等. 张北柔性直流电网示范工程控制系统架构及协调控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(9): 164-173.  
DU Xiaolei, GUO Qinglei, WU Yankun, et al. Research on control system structure and coordination control strategy for Zhangbei demonstration project of MMC-HVDC Grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(9): 164-173(in Chinese).
- [3] 叶敏芝, 喻哲扬, 徐政. 欧洲柔性直流电网的规划及其仿真研究[J]. 电力工程技术, 2020, 39(6): 66-75.  
YE Minzhi, YU Zheyang, XU Zheng. Planning and simulation research of European VSC-HVDC grid[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(6): 66-75(in Chinese).
- [4] 林湘宁, 胡仙清, 童宁, 等. 具备高灵敏性与速动性的柔性直流输电系统纵联保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(14): 130-139.  
LIN Xiangning, HU Xianqing, TONG Ning, et al. A pilot protection scheme for an VSC-MTDC system with high sensitivity and rapidity[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14): 130-139(in Chinese).
- [5] 郭贤珊, 卢亚军, 郭庆雷. 张北柔性直流电网试验示范工程直流控制保护设计原则与验证[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(2): 181-189.  
GUO Xianshan, LU Yajun, GUO Qinglei. Design principle and verification of control and protection system for Zhangbei VSC-HVDC grid demonstration project[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(2): 181-189(in Chinese).
- [6] 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(in Chinese).
- [7] 赵成勇, 宋冰倩, 许建中. 柔性直流电网故障电流主动控制典型方案综述[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(5): 3-13. ZHAO Chengyong, SONG Bingqian, XU Jianzhong. Overview on typical schemes for active control of fault current in flexible DC grid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(5): 3-13(in Chinese).
- [8] FERREIDOUNI A R, VAHIDI B, HOSSEINI MEHR T. The impact of solid state fault current limiter on power network with wind-turbine power generation[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2013, 4(2): 1188-1196.
- [9] SNEATH J, RAJAPAKSE A D. Fault detection and interruption in an earthed HVDC grid using ROCOV and hybrid DC breakers[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2016, 31(3): 973-981.
- [10] 何俊佳. 高压直流断路器关键技术研究[J]. *高电压技术*, 2019, 45(8): 2353-2361. HE Junjia. Research on key technologies of high voltage DC circuit breaker[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(8): 2353-2361(in Chinese).
- [11] 王振浩, 田奇, 成龙, 等. 混合式高压直流断路器暂态分断特性及其参数影响分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(18): 1-10. WANG Zhenhao, TIAN Qi, CHENG Long, et al. Transient breaking characteristics and its parameter influence analysis of hybrid DC circuit breaker[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(18): 1-10(in Chinese).
- [12] 陈艳霞, 吕立平, 李振兴, 等. 基于超导故障限流器的多级馈线电流保护新方案[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(24): 86-94. CHEN Yanxia, LÜ Liping, LI Zhenxing, et al. A new current protection scheme based on a superconducting fault current limiter for a multi-stage feeder[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(24): 86-94(in Chinese).
- [13] 王通, 姚磊, 奚培锋, 等. 基于PSCAD的饱和铁芯型超导限流器性能分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(5): 72-80. WANG Tong, YAO Lei, XI Peifeng, et al. Performance analysis of saturated core-type superconducting current limiter based on PSCAD[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(5): 72-80(in Chinese).
- [14] 陈家帅, 黄彦全, 卢博衍, 等. 一种结合直流断路器的直流故障限流器拓扑[J]. *高压电器*, 2020, 56(5): 33-38. CHEN Jiashuai, HUANG Yanquan, LU Boyan, et al. DC fault current limiter topology combined with DC circuit breaker[J]. *High Voltage Apparatus*, 2020, 56(5): 33-38(in Chinese).
- [15] 李清波, 林佳壕. 基于混合型柔性限流器直流配网故障暂态特性研究[J]. *电气工程学报*, 2020, 15(4): 65-74. LI Qingbo, LIN Jiahao. Study on fault transient characteristics of DC distribution network based on hybrid flexible current limiter[J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2020, 15(4): 65-74(in Chinese).
- [16] 郝鑫, 王盼宝, 孙红梅, 等. 直流故障限流器工作原理分析与特性研究[J]. *电网技术*, 2019, 43(12): 4414-4424. HAO Xin, WANG Panbao, SUN Hongmei, et al. Principle and characteristic analysis of existing DC fault current limiters[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(12): 4414-4424(in Chinese).
- [17] HUANG Q, ZOU G B, SUN W J, et al. Fault current limiter for the MMC-based multi-terminal DC grids[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2020, 14(16): 3269-3277.
- [18] 张翀, 邱清泉, 张志丰, 等. 直流混合型断路器与直流故障限流器的匹配研究[J]. *电工电能新技术*, 2016, 35(9): 21-28. ZHANG Chong, QIU Qingquan, ZHANG Zhifeng, et al. Study on coordination of DC hybrid circuit breaker and DC fault current limiter[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2016, 35(9): 21-28(in Chinese).
- [19] 韩乃峥, 贾秀芳, 赵西贝, 等. 一种新型混合式直流故障限流器拓扑[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(6): 1647-1658. HAN Naizheng, JIA Xiufang, ZHAO Xibei, et al. A novel hybrid DC fault current limiter topology[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(6): 1647-1658(in Chinese).
- [20] 朱思丞, 赵成勇, 李承昱, 等. 含直流故障限流装置动作的直流电网故障电流计算方法[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(2): 469-478. ZHU Sicheng, ZHAO Chengyong, LI Chengyu, et al. The DC fault current calculation of DC fault current limiter action included in bipolar MMC-HVDC grid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(2): 469-478(in Chinese).
- [21] 李志兵, 颜湘莲, 刘北阳, 等. 混合型快速机构真空断路器设计与试验[J]. *高电压技术*, 2018, 44(6): 1791-1799. LI Zhibing, YAN Xianglian, LIU Beiyang, et al. Design and test of vacuum circuit breaker with hybrid fast operating mechanism[J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(6): 1791-1799(in Chinese).
- [22] HÄFNER J, JACOBSON B. Proactive hybrid HVDC breakers-A key innovation for reliable HVDC grids[C]// *Proc. CIGRE Bologna Symposium*. 2011: 1-8.
- [23] WANG Y Q, MARQUARDT R. A fast switching, scalable DC-breaker for meshed HVDC SuperGrids[C]// *PCIM Europe 2014, International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*. May 20-22, 2014, Nuremberg, Germany. VDE, 2014: 1-7.

收稿日期: 2021-07-23; 修回日期: 2021-09-04。



郝晓弘

作者简介:

郝晓弘 (1960), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为可再生能源发电与传输技术。通信作者, E-mail: haoxh@lut.edu.cn。

黄伟 (1994), 男, 硕士研究生, 研究方向为高压直流输电、柔性直流输电技术, E-mail: 1689965776@qq.com。

裴婷婷 (1990), 女, 博士, 讲师, 研究方向为可再生能源发电和柔性直流输电技术, E-mail: peitt52@163.com。

(责任编辑 李锡)

## 附录A 闭锁前换流站过电流公式推导

换流站闭锁前, 直流故障电流的等效放电回路 (不考虑交流侧电源馈流部分) 如正文图2所示。且在其子模块电容电压平衡控制作用下, 每一相参数  $C_{eq}$ 、 $L_{eq}$  和  $R_{eq}$  等效为

$$\begin{cases} C_{eq} = \frac{2C_0}{n} \\ L_{eq} = 2L_s \\ R_{eq} = nR_{on_i} + nR_{on_d} \end{cases} \quad (A1)$$

式中:  $R_{on_i}$ 、 $R_{on_d}$  分别为IGBT和二极管的导通电阻。

电容放电回路进一步等效为RLC二阶电路, 如图A1所示,  $R'$ 、 $L'$  和  $C'$  分别为桥臂的等效电阻值、电感值和电容值

$$\begin{cases} C' = \frac{6C_0}{n} \\ L' = \frac{2L_s}{3} + 2L_d + L_l \\ R' = \frac{R_{eq}}{3} + R_1 + R_f \end{cases} \quad (A2)$$

式中:  $R_1$ 、 $L_l$  分别为线路的等效电阻值、电感值,  $R_f$  为双极短路故障接触电阻。

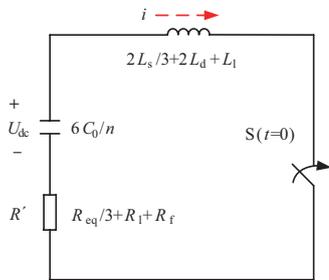


图 A1 电容放电回路RLC等效电路

Fig. A1 RLC equivalent circuit of capacitor discharge circuit

换流站闭锁前, 子模块电容的放电是一个振荡放电过程。电路初始条件为

$$\begin{cases} u_c(0_+) = u_c(0_-) = U_{dc} \\ i_c(0_+) = i_c(0_-) = C_{eq} \frac{du_c}{dt} = I_d \end{cases} \quad (A3)$$

式中:  $U_{dc}$  为换流器直流侧电压,  $I_d$  为单相桥臂上稳态时的电流值。

由图A2可知, 放电过程的数学模型可以被描述为

$$L'C' \frac{d^2 U_{dc}}{dt^2} + C'R' \frac{dU_{dc}}{dt} + U_{dc} = 0 \quad (A4)$$

在实际系统中, IGBT和二极管的导通电阻非常小, 且直流线路的等效电阻  $R_1$  也非常小, 故  $R'$  通常远小于  $2\sqrt{L'/C'}$ 。式 (A4) 的特征根是一对共轭复根, 为

$$\lambda_{1,2} = -\frac{R'}{2L'} \pm \sqrt{\left(\frac{R'}{2L'}\right)^2 - \frac{1}{L'C'}} = -\sigma \pm j\omega' \quad (A5)$$

式中:  $\sigma = R'/2L'$  为衰减系数,  $\omega' = \sqrt{1/L'C' - (R'/2L')^2}$  为振荡角频率, 一般  $R'/(2L') \ll 1/(L'C')$ , 则

$$\omega' \approx \omega = \sqrt{1/L'C'} \quad (A6)$$

式中:  $\omega$  为固有振荡角频率。

直流侧发生双极短路故障时, 可认为  $R_1=0$ ,  $L_l=0$ ,  $R_f=0$ 。由式 (A4) 可得放电电流  $i$  为

$$i = e^{-\sigma t} \left[ U_{dc} \sqrt{\frac{C'}{L'}} \sin(\omega t) + I_d \cos(\omega t) \right] \quad (A7)$$

直流侧发生双极短路故障时, 可认为  $R_1=0$ ,  $L_l=0$ ,  $R_f=0$ 。令  $\varphi = \arctan\left(\frac{I_d}{U_{dc}} \sqrt{\frac{L'}{C'}}\right)$ , 则式 (A7) 可改写为

$$i = e^{-\sigma t} \left[ \frac{C'}{L'} U_{dc}^2 + I_d^2 \right] \sin(\omega t + \varphi) \quad (A8)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{n}{(4L_s + 12L_d)C_0}} \quad (A9)$$

进一步可得放电电流峰值 $I_m$ 、放电电流达到峰值的时间 $t_m$ 为

$$I_m = e^{-\sigma t} \left( U_{dc} \sqrt{\frac{C'}{L'} + \frac{I_d^2 \omega L'}{U_{dc}}} \right) \sqrt{\frac{U_{dc}^2}{I_d^2 \omega^2 L'^2 + U_{dc}^2}} \quad (\text{A10})$$

$$t_m = \frac{1}{\omega} \arctan \left( \frac{U_{dc}}{I_d} \sqrt{\frac{C'}{L'}} \right) \quad (\text{A11})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} A = \sqrt{U_0^2 + \left( \frac{U_0 \sigma}{\omega} - \frac{I_0}{\omega C_s} \right)^2} \\ \theta = \arctan \left( \frac{U_0}{\frac{U_0 \sigma}{\omega} - \frac{I_0}{\omega C_s}} \right) \\ \sigma = \frac{R'}{2L''} \\ \omega'' = \sqrt{\left( \frac{R'}{2L''} \right)^2 - \frac{1}{L'' C_s}} \end{array} \right. \quad (\text{A12})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} i_3(t) = -C_s \frac{dU_{dc}(t)}{dt} \\ U_{L'}(t) = L' \frac{di_3(t)}{dt} \\ U_L(t) = L \frac{di_3(t)}{dt} \\ C \frac{dU_c(t)}{dt} = -C_s \frac{dU_{dc}(t)}{dt} \end{array} \right. \quad (\text{A13})$$

## 附录B 结合限流电路的混合DCCB公式推导

$t_0$ 时刻故障初期，由KVL得到直流侧等效电路的表达式为

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{L'}(t) = L' \frac{di_1(t)}{dt} \\ U_L(t) = L \frac{di_1(t)}{dt} \\ i_1(t) = -C_s \frac{dU_{dc}(t)}{dt} \\ U_{dc} = R' i_1(t) + U_{L'}(t) + U_L(t) \end{array} \right. \quad (\text{B1})$$

$t_3$ 时刻，故障电流流过限流电容和吸能电阻串联的缓冲支路，由KVL可得

$$\left\{ \begin{array}{l} i_2(t) = -C_s \frac{dU_{dc}(t)}{dt} \\ U_{L'}(t) = L' \frac{di_2(t)}{dt} \\ U_L(t) = L \frac{di_2(t)}{dt} \\ C \frac{dU_c(t)}{dt} = -C_s \frac{dU_{dc}(t)}{dt} \\ U_{dc} = (R' + R'') i_2(t) + U_{L'}(t) + U_L(t) + U_c \end{array} \right. \quad (\text{B2})$$