

# 柔性直流系统新型故障限流技术研究

滕尚甫<sup>1,2,3</sup>, 肖立业<sup>1,2,3</sup>, 张志丰<sup>1,2</sup>, 韦统振<sup>2,3</sup>, 官瑞磊<sup>4</sup>

(1. 中国科学院应用超导重点实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院电工研究所, 北京 100190;  
3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 山东泰开高压开关有限公司, 山东 泰安 271000)

**摘要:** 基于模块化多电平换流器的柔性直流输电技术发展迅速, 直流侧短路故障电流的开断问题日益成为研究热点。故障限流技术能够有效抑制直流故障电流的快速增长, 为直流断路器隔离故障提供有利条件。文中提出一种新型限流电路, 利用电容器组合放电实现故障电流限制, 配合直流断路器实现快速限流开断。对该电路的结构及工作原理进行阐述, 给出电路参数选取方法。利用 MATLAB/Simulink 建立仿真模型, 仿真结果验证了限流电路的有效性。

**关键词:** 柔性直流; 新型限流电路; 直流断路器; 故障电流限制; 能量流动

**DOI:** 10.12067/ATEEE2006034      **文章编号:** 1003-3076(2020)11-0066-07      **中图分类号:** TM72

## 1 引言

基于模块化多电平换流器 (Modular Multilevel Converter, MMC) 的柔性高压直流 (High Voltage Direct Current, HVDC) 输电技术具有独立潮流控制、便于可再生能源整合和电网互联、无换相失败问题、高可扩展性、低谐波含量等特点, 得到广泛关注和发展。多端柔性直流输电因具有较好的灵活性、可靠性和经济性, 成为建设智能电网的重要技术手段<sup>[1-4]</sup>。

故障电流上升快以及无自然过零点, 是直流系统开断困难的主要原因<sup>[5,6]</sup>。尽管目前研制出的直流断路器 (Direct Current Circuit Breaker, DCCB) 能够有选择地快速隔离故障, 保证系统非故障区域的正常运行<sup>[7-10]</sup>, 然而, 如果能够在直流断路器开断前有效限制短路电流的上升速度和大小, 则可以保障在换流站不闭锁的情况下开断故障电流, 并减少避雷器的耗能量。因此发展直流限流技术具有重要意义。

故障限流技术可以限制故障电流, 降低直流断路器的设计难度, 成为应对直流电网故障的研究课题之一。目前, 限流器 (Fault Current Limiter, FCL) 主要有固态型和超导型两种<sup>[11,12]</sup>。超导型限流器是较为理想的限流器, 但高度依赖冷却系统、造价高

昂、恢复速度较慢, 因此在短期内还不具备大规模应用条件。固态型限流器主要基于电力电子开关, 响应速度快、可控制性高, 由于采用大量全控型电力电子器件, 受器件容量限制, 且成本偏高<sup>[13,14]</sup>。

文献[15,16]分别提出了限流式混合直流断路器, 结构相似, 均是通过控制来改变在直流线路串入电感的大小, 起到一定的限流作用。文献[17]提出的直流限流器利用电容充放电来实现特定支路的导通和关断, 实质上通过接入限流电感进行限流。文献[18]针对直流配电网, 提出一种限流型能量转移直流断路器, 但需在快速机械开关分闸后限流器才能投入, 限流速度较慢。

当前, 大多数的限流方案是利用电抗器限流、并依赖于全控型电力电子器件, 而且限流强度和响应速度有待改善。本文提出一种新型故障限流电路, 利用电容加压限流, 且不使用全控型电力电子器件, 具备限流能力强和限流速度快的特点。混合式直流断路器是目前开断直流故障最具前景的一种直流断路器, 为此, 本文以配合典型的混合直流断路器为例, 分析限流电路的工作原理以及能量流动过程, 给出电路参数设计原则, 最后在 MATLAB/Simulink 中建立仿真系统模型, 验证了所提限流方案的可行性与有效性。

**收稿日期:** 2020-06-16  
**基金项目:** 国家自然科学基金创新研究群体项目 (51721005)  
**作者简介:** 滕尚甫 (1990-), 男, 江苏籍, 博士研究生, 研究方向为直流断路器、直流限流技术;  
肖立业 (1966-), 男, 湖南籍, 研究员, 博导, 博士, 研究方向为智能电网技术 (通讯作者)。

## 2 混合直流断路器原理

全球能源互联网研究院提出的全桥模块级联结构混合式直流断路器已经成功应用于多端柔性直流工程<sup>[19,20]</sup>,其拓扑主要分为主支路、转移支路和耗能支路,如图1所示。

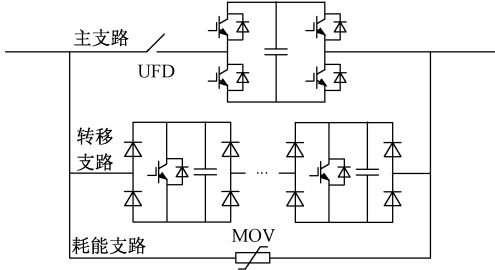


图1 基于全桥级联结构的混合式直流断路器

Fig.1 Full bridge cascaded structure based hybrid DCCB

正常运行时,线路电流仅流经主支路。故障发生后,通过两次换流实现电流分断。断路器收到动作指令,导通转移支路模块,闭锁主支路模块,故障电流在主支路和转移支路之间完成换流,超高速隔离开关(Ultrafast Disconnecter, UFD)开始无弧分断。当UFD达到安全开距后,闭锁转移支路的模块,当短路电流对转移支路各模块形成的串联电容充电至避雷器(Metal Oxide Varistor, MOV)动作电压时,短路电流转移至MOV直至直流网络中能量被完全耗散,实现故障清除。

## 3 新型故障限流电路及工作原理

### 3.1 限流电路

针对MMC-HVDC系统直流线路故障电流具有上升率高的特点,本文提出一种限流电路,配置在直流断路器一侧,起到限制故障电流的作用。限流电路结构如图2中虚框内所示。

限流电路的组成包括:电容器组 $C_1$ 、 $C_2$ ,晶闸管阀组 $T_1$ ,两个充电支路分别由 $T_{c1}$ 、 $r_{c1}$ 和 $T_{c2}$ 、 $r_{c2}$ 组成,两个吸能支路分别由 $D_1$ 、 $r_1$ 和 $D_2$ 、 $r_2$ 组成,以及普通机械开关K。其中,电容均配有避雷器(MOV)用作限压保护; $L$ 为限流电感;DCCB采用图1所示混合直流断路器。

### 3.2 限流原理

限流电路结合直流断路器的结构如图2所示,限流电路连接在DCCB的右侧,将原直流系统的限流电感 $L$ 配置在限流电路的右侧。设置直流输电系统正常运行时线路电流方向由左至右,短路故障发

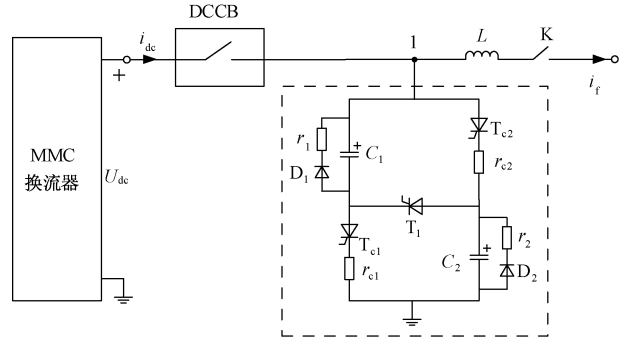


图2 与直流断路器连接的限流电路

Fig.2 Topology of current limiting circuit connected with DCCB

生在开关K右端。DCCB左侧为换流站,直流电流记为 $i_{dc}$ ;K右侧为故障侧,电流记为 $i_t$ ;直流系统电压记为 $U_{dc}$ 。

直流断路器与限流电路投入系统之前,K为断开状态,导通DCCB的主支路,并触发晶闸管 $T_{c1}$ 、 $T_{c2}$ ,直流系统分别对电容 $C_1$ 、 $C_2$ 进行充电,两电容均被充电至系统电压后,充电电流降至零, $T_{c1}$ 、 $T_{c2}$ 自然关断。随后闭合开关K,将DCCB与限流电路投入线路。通过对 $r_{c1}$ 、 $r_{c2}$ 的参数设计,可以控制电容充电电流和时间。

系统正常运行时,线路电流经过DCCB主支路和电感。限流电路不工作,不增加运行损耗,同时由于限流电路并联在输电线路,因此也不影响系统的正常运行。

在短路故障发生后,故障电流达到设定阈值 $I_a$ ,保护系统检测到故障,DCCB和限流电路开始动作,首先导通DCCB的转移支路模块,同时触发限流电路中的晶闸管 $T_1$ 、闭锁DCCB主支路的全桥模块。电容 $C_1$ 、 $C_2$ 变为串联结构,等效电容记为 $C$ ,节点1的电位立即被抬升至 $2U_{dc}$ ,电容迅速放电,同时,对换流站侧电流 $i_{dc}$ 起到限制作用。

DCCB经过主支路与转移支路之间、转移支路与耗能支路之间的两次换流过程实现电流分断。在DCCB分断电流期间, $C$ 与换流站侧电路等效电感产生的振荡电流反向注入DCCB中,使得DCCB中故障电流大幅减小。DCCB分断电流后,限流电路继续与 $L$ 、故障点形成通路 $C_2$ - $T_1$ - $C_1$ - $L$ - $K$ ;在电容 $C_1$ 、 $C_2$ 的电压过零反向后,反向电压达到二极管 $D_1$ 、 $D_2$ 的导通压降时,吸能支路导通,部分电流流经电阻 $r_1$ 、 $r_2$ ,直至 $L$ 上的能量被吸能支路耗散,开关K在电流过零时分断,整个故障清除过程结束。

由于大部分电感能量被吸能支路消耗,减少了

DCCB 的避雷器所吸收的能量,从而降低避雷器的设计难度,提高 DCCB 的长期工作可靠性。

3.3 限流电路参数设计

对于充电支路,电阻  $r_{c1}$  与  $r_{c2}$  的选择应考虑充电电流峰值和充电时间两个因素。充电电流峰值应小于直流系统额定电流值,可得:

$$r_{c1} = r_{c2} \geq \frac{U_{dc}}{I_{dc}}$$

(1)

式中,  $I_{dc}$  为直流系统额定电流。

直流系统在分断故障后要要进行重合闸,而重合闸时间间隔约为 300 ms<sup>[21,22]</sup>,在此时间段内,限流电路要就绪,即要完成对电容的再充电。因此,在考虑一定裕量的情况下电容充电的  $RC$  时间常数应该控制在几十毫秒之内。

DCCB 中 UFD 经过 2 ms 时间达到安全开距<sup>[23,24]</sup>,此时间段内故障电流经过转移支路。限流电路的电容与换流站侧电路产生振荡电流,该振荡电流的周期记为  $T_0$ ,为了保证电流转移至 MOV 时的幅值小于投入限流电路时的电流值,  $T_0$  应满足:

$$\frac{T_0}{2} \approx \pi \sqrt{L'C} > t_{UFD}$$

(2)

式中,  $C$  为  $C_1$ 、 $C_2$  的串联等效电容;  $t_{UFD}$  为 2 ms;  $L'$  为换流站侧电路的等效电感。

反向电流幅值  $I_{cmax}$  应略小于故障检测电流阈值  $I_a$ 。限流电路提供的反向电流幅值可近似为:

$$I_{cmax} \approx U_{dc} \sqrt{\frac{C}{L'}}$$

(3)

与电容并联的吸能支路导通后,故障侧电路主要为  $RL$  电路,电路剩余的能量逐渐被消耗,时间常数不能过大,以缩短故障清除的整体时间。

4 仿真分析

为说明限流电路的基本运行效果,在 MATLAB/Simulink 中搭建了单端 MMC 仿真模型,直流侧额定参数为  $U_{dc} = 500$  kV,  $I_{dc} = 3$  kA; MMC 采用半桥型子模块,参数如下:子模块数 300,子模块电容 11.5 mF,桥臂电感 100 mH;线路的限流电感  $L$  为 110 mH;设置在 2 s 时刻发生短路故障,故障电流检测阈值  $I_a = 2I_{dc}$ 。

4.1 混合式 DCCB 故障开断仿真

仿真结构如图 3 所示,系统仅配置 DCCB 而无限流电路。DCCB 采用图 1 中的拓扑, MOV 动作电压设为 750 kV。仿真结果如图 4 所示。

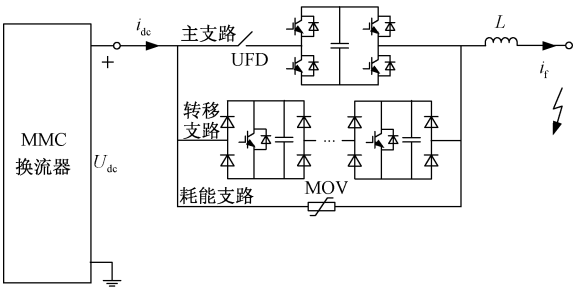
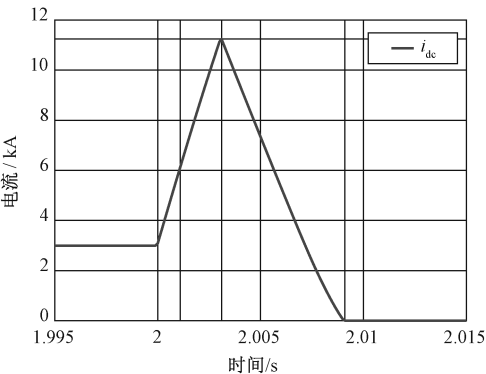
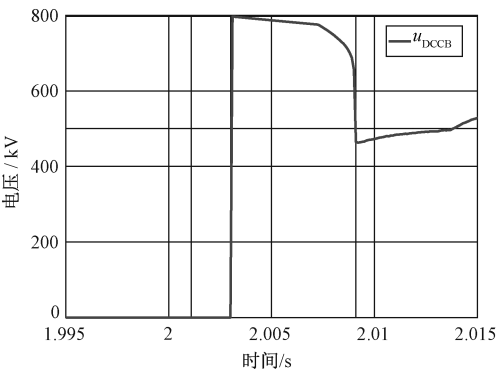


图 3 混合直流断路器仿真模型

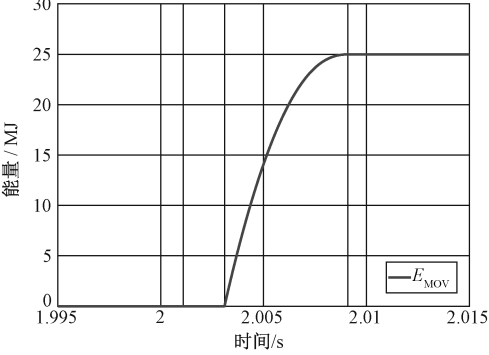
Fig.3 Simulation model of hybrid DCCB



(a) 直流断路器开断电流波形



(b) 直流断路器开断电压波形



(c) 避雷器吸能波形

图 4 混合直流断路器仿真波形

Fig.4 Simulation waveforms of hybrid DCCB

由图 4 可知,正常运行时,线路电流为 3 kA,在

故障电流达到 6 kA 时,断路器动作。UFD 分断 2 ms 后,电流开始转移至 MOV,逐步衰减。故障开断的电流峰值达到 11.3 kA,经 9.1 ms 过零;DCCB 两端电压被限制在残压 800 kV。在电流衰减过程中,避雷器的吸能为 25 MJ。

4.2 增加限流电路的故障开断

所提限流电路与 DCCB 配合的仿真模型如图 5 所示。根据第 3 节分析,选取一组较优的限流参数: $r_{c1}=r_{c2}=400\ \Omega$ , $r_1=r_2=10\ \Omega$ , $C_1=C_2=34\ \mu\text{F}$ , $L=110\ \text{mH}$ 。

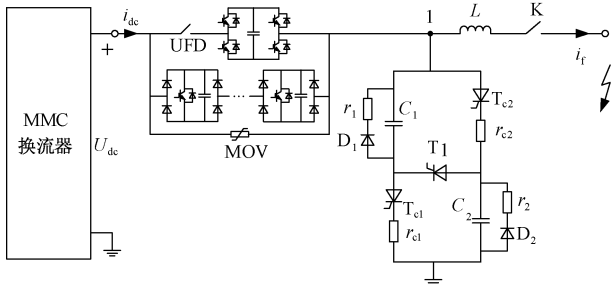


图 5 限流电路仿真系统

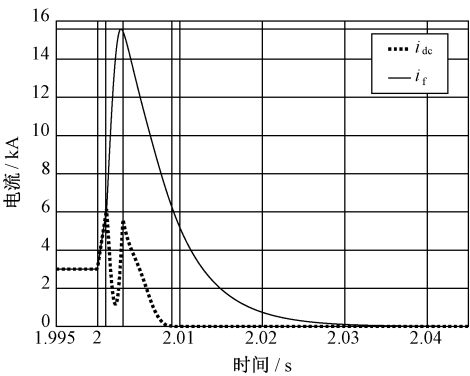
Fig.5 Simulation system of current limiting circuit

由于增加了限流电路,使得换流站侧电流  $i_{dc}$  与故障侧电流  $i_f$  在开断过程中不相同,波形如图 6(a) 所示。故障电流达到 6 kA 时,限流电路投入, $i_{dc}$  立即减小,经 9.0 ms 过零,并在衰减至零的整个过程中始终低于 6 kA。电流  $i_f$  最大幅值达到 15.55 kA,经过 40 ms 左右降至零。

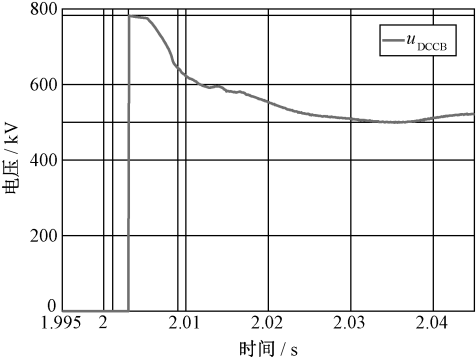
由图 6(b) 可知,DCCB 的电压为 785 kV,起到了更好地保护作用。图 6(c) 展现了能量耗散情况,MOV 吸能为 9.6 MJ,其余能量被电阻  $r_1$ 、 $r_2$  吸收,与仅 DCCB 的情况相比,避雷器吸能减少了 15.4 MJ,降低比例为 61.6%,将系统的故障开断能量大部分转移至吸能支路的电阻中,有效避免了直流断路器中避雷器吸收能量巨大的状况,提高 DCCB 的分断可靠性。

为了直观地表明限流能力,将增加限流电路前后的换流站侧电流进行对比,如图 7 所示。可以看出,增加限流电路后,故障电流峰值下降了 46.9%;在检测到故障后,电流立即衰减,有效降低或避免换流器闭锁的情况,表明了所提限流电路具备很强的限流能力。

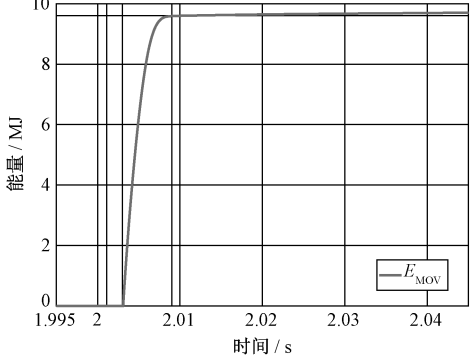
由于 DCCB 分断电流的幅值大幅降低,能在很大程度上减小 DCCB 的设计参数,降低成本。



(a) 限流开断电流波形



(b) 限流开断电压波形



(c) 限流开断避雷器吸能波形

图 6 限流电路仿真波形

Fig.6 Simulation waveforms of current limiting circuit

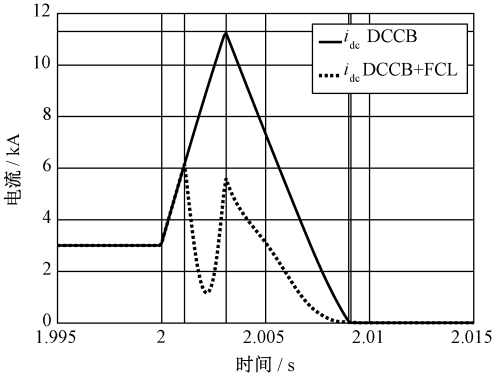


图 7 换流站侧电流比较

Fig.7 Comparison of  $i_{dc}$



4.3 增加限流电路的重合闸能力分析

增加限流电路后,要配合 DCCB 进行重合闸操作,必须在重合闸前完成对限流电路电容的再充电。由于一次故障分断与重合闸之间的间隔约为 300 ms,因此只要在 2.34 s 时刻前电容充电完成,即可满足要求。

首次限流开断后,K 分断,随后导通 DCCB,同时触发  $T_{c1}$ 、 $T_{c2}$ ,直流系统对  $C_1$ 、 $C_2$  充电,图 8 所示为电容的电压变化波形,波形完全重合。

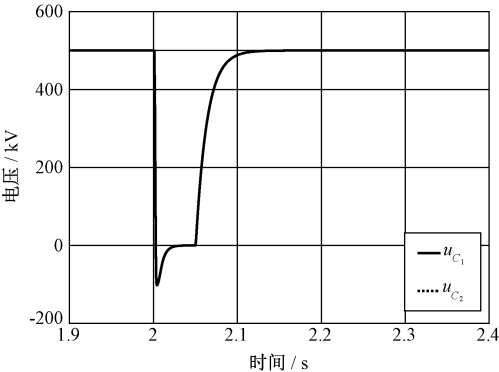


图 8 电容电压波形  
Fig.8 Voltages of capacitors

从图 8 可看出,电容在 2.15 s 时刻之前便完成了充电,具备再次限流能力,此时闭合 K 来完成重合闸。

5 多端口限流电路应用分析

MMC 型直流系统中,若一条直流母线共有  $n$  条线路连接,则该母线需配备  $n$  个 DCCB ( $n$  为正整数)。所提限流电路可以为直流母线所有线路提供故障限流功能,其多端口结构连接方式如图 9 所示。其中,晶闸管  $T_p$  作为限流电路电容充电的总开关,与  $T_{c1}$ 、 $T_{c2}$  同步动作,电容充电完成后, $T_p$ 、 $T_{c1}$ 、 $T_{c2}$  均截止。晶闸管  $T_{L1}$ 、 $T_{L2}$ 、 $\cdots$ 、 $T_{Ln}$  作为  $n$  条线路的选择开关,若故障发生在某条线路,则导通  $T_i$  和对应故障线路的选择开关,进行故障限流。

6 经济性分析

按照文中的系统参数,选取目前相对比较成熟的大功率 IGBT、晶闸管和二极管器件作为选型方案,以 4.5 kV/3 kA 的 IGBT、8.5 kV/4.4 kA 的晶闸管、6 kV/4.2 kA 的二极管为例。仅 DCCB 和增加限流电路这两种方案的经济性对比分析如下:

仅图 1 所示 DCCB 的方案记为方案 1,最大短路电流为 11.3 kA,耐受电压为 800 kV。主支路的

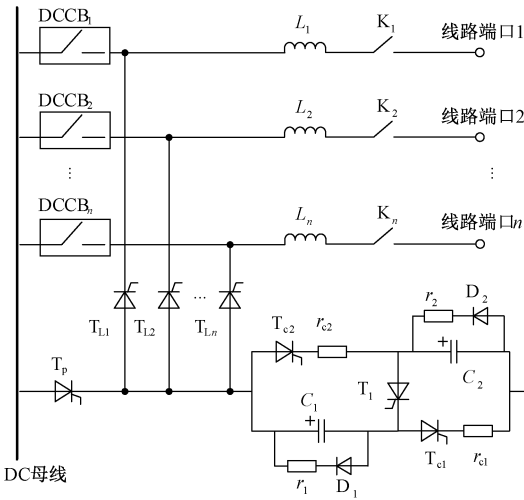


图 9 多端口限流电路结构  
Fig.9 Structure of multi-port current limiting circuit

IGBT 耐压较低,其数量暂时不计。转移支路采用二极管桥的结构,需要 178 个串联的桥模块,桥中每个 IGBT 的并联数量为 4 个,故共需配备 712 个 IGBT, 178 个电容以及 712 个二极管。

DCCB 配合限流电路的方案记为方案 2,DCCB 的最大短路电流为 6 kA,耐受电压为 785 kV,DCCB 所需的 IGBT 数量为 350 个,二极管为 700 个。限流电路的造价主要由晶闸管、二极管和电容组成。大功率晶闸管和二极管均具备很强的短时耐受过电流能力,在限流开断过程中,晶闸管  $T_i$  耐受电压为 685 kV,需要配备晶闸管 81 个;吸能支路二极管  $D_1$ / $D_2$  的最大电压为 500 kV,所需数量为 168 个;充电支路的晶闸管  $T_{c1}$ / $T_{c2}$  最大电压为 500 kV,所需数量为 118 个,由于充电电流较小,可选择电流参数更小的晶闸管器件。

针对单条线路,两种方案的元器件用量对比如表 1 所示。相比方案 1,方案 2 使得价格昂贵的 IGBT 用量减少了 51%,同时也减少了相应的缓冲电路、供能和散热设备;虽然增加了少量晶闸管和二极管,但其耐压、过流能力强,技术成熟,价格相对便宜;同时,DCCB 的避雷器配置也降低了一半以上;吸能支路的电阻造价也相对较低。从限流电路大幅降低换流器故障电流的情况来看,方案 2 还能够减小换流器的造价,即便还需要两组电容器的投资,与方案 1 相比仍具有一定的经济优势。当在多端 MMC 型直流电网应用时,限流电路需再增加  $(n+1)$  组晶闸管,但该限流电路可以降低直流母线所有线路上 DCCB 的成本,因此,具有一定的应用前景。

表 1 两种方案的元器件用量对比

Tab.1 Economic comparison of two schemes

项目	IGBT 数/个	晶闸管 数/个	二极管 数/个	电容器 /组	MOV 耗 能/MJ
方案 1	712	0	712	178	25
方案 2	350	81+118	700+168	178+2	9.6

7 结论

针对柔性直流系统直流故障电流发展速度快、分断困难的现状,提出一种新型限流电路,通过电容组合放电来抑制电流、通过增加吸能支路来分散能量流动,达到了限制故障电流、降低 DCCB 设计难度的效果,并具备配合 DCCB 实现快速重合闸的能力。

文中阐述了限流电路的结构及原理,分析了增加限流电路在故障限流和能量吸收方面的优点,针对仅 DCCB 开断故障以及增加限流电路开断故障两种情况进行建模仿真,仿真结果验证了所提限流电路的可行性与有效性。最后,对多端口限流电路进行了说明,并分析了限流电路所带来的经济性,具有实际应用的潜力,为解决柔性直流系统故障电流的开断问题提供了新思路。文章初步提出了限流电路拓扑,对于进一步降低直流线路电流、应用可靠性等方面,将作为下一步的研究工作。

参考文献 (References):

[ 1 ] Debnath S, Qin J, Bahrani B, et al. Operation, control, and applications of the modular multilevel converter: a review [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30 (1): 37-53.

[ 2 ] 杨立敏, 李耀华, 王平, 等 (Yang Limin, Li Yaohua, Wang Ping, et al.). 适用于±500 kV/3 000 MW 柔性直流输电换流器的电路拓扑损耗特性研究 (Research on loss characteristics of topologies for ±500 kV/3000 MW VSC-HVDC converters) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (6): 1-8.

[ 3 ] 徐殿国, 张书鑫, 李彬彬 (Xu Dianguo, Zhang Shuxin, Li Binbin.). 电力系统柔性一次设备及其关键技术: 应用与展望 (Flexible primary equipment of power system and its key technologies: Application and prospect) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2018, 42 (7): 2-22.

[ 4 ] 荣飞, 李文君, 饶宏, 等 (Rong Fei, Li Wenjun, Rao Hong, et al.). 全桥 MMC 柔性直流输电系统冗余度优化方法 (Method of optimizing redundancy of converter in MMC based flexible DC transmission system) [J]. 电工

电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (3): 26-32.

[ 5 ] 滕尚甫, 肖立业, 邱清泉, 等 (Teng Shangfu, Xiao Liye, Qiu Qingquan, et al.). 基于电容换流的高压直流断路器研究 (Research on HVDC circuit breaker based on capacitor commutation) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2018, 44 (7): 2196-2204.

[ 6 ] 张翀, 邱清泉, 张志丰, 等 (Zhang Chong, Qiu Qingquan, Zhang Zhifeng, et al.). 直流混合型断路器与直流故障限流器的匹配研究 (Study on coordination of DC hybrid circuit breaker and DC fault current limiter) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (9): 21-28.

[ 7 ] 刘剑, 何雨微, 徐祥海, 等 (Liu Jian, He Yuwei, Xu Xianghai, et al.). 柔性直流电网故障限流技术分析与探讨 (Analysis and discussion of fault current limiting technology in flexible DC grid) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 2020, 40 (4): 9-16.

[ 8 ] Mokhberdoran A, Gomisbellmunt O, Silva N, et al. Current flow controlling hybrid DC circuit breaker [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33 (2): 1323-1334.

[ 9 ] 陈超, 刘文君, 俞天毅, 等 (Chen Chao, Liu Wenjun, Yu Tianyi, et al.). 基于直流系统故障保护的三端口直流断路器拓扑研究 (Topology research of three-port solid state circuit breaker based on DC system fault protection) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (6): 58-64.

[ 10 ] Teng S, Zhang Z, Xiao L. Research on a novel DC circuit breaker based on artificial current zero-crossing [J]. IEEE Access, 2020, 8: 36070-36079.

[ 11 ] 官二勇, 董新洲, 冯腾 (Guan Eryong, Dong Xinzhou, Feng Teng). 一种固态直流限流器拓扑结构 (A solid DC current limiter topology) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2017, 37 (4): 978-986.

[ 12 ] 刘凯, 陈红坤, 林军, 等 (Liu Kai, Chen Hongkun, Lin Jun, et al.). 故障限流器在电力系统中应用研究现状 (Study situation of applications of fault current limiter in power system) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2010, 38 (7): 147-151.

[ 13 ] 涂春鸣, 姜飞, 郭成, 等 (Tu Chunming, Jiang Fei, Guo Cheng, et al.). 多功能固态限流器的现状 & 展望 (Present state and perspectives of multi-function solid-state fault current limiter) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2015, 30 (16): 146-153.

[ 14 ] 郑健超 (Zheng Jianchao). 故障电流限制器发展现状

- 与应用前景 (Current status and application prospect of fault current limiters) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2014, 34 (29): 5140-5148.
- [15] 李承昱, 李帅, 赵成勇, 等 (Li Chengyu, Li Shuai, Zhao Chengyong, et al.). 适用于直流电网的限流混合式直流断路器 (A novel topology of current-limiting hybrid DC circuit breaker for DC grid) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2017, 37 (24): 7154-7162.
- [16] 许建中, 张继元, 李帅, 等 (Xu Jianzhong, Zhang Jiyuan, Li Shuai, et al.). 一种阻容型限流式直流断路器拓扑及其在直流电网中的应用 (A resistor-capacitor type current-limiting high voltage DC circuit breaker and its application in DC grid) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2020, 40 (8): 2618-2628.
- [17] 赵西贝, 许建中, 苑津莎, 等 (Zhao Xibei, Xu Jianzhong, Yuan Jinsha, et al.). 一种新型电容换相混合式直流限流器 (A novel capacitor commutated hybrid DC fault current limiter) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2018, 38 (23): 6915-6923.
- [18] Tang S, Chen M, Jia G, et al. Topology of current-limiting and energy-transferring DC circuit breaker for DC distribution networks [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020, 6 (2): 298-306.
- [19] An T, Tang G, Wang W. Research and application on multi-terminal and DC grids based on VSC-HVDC technology in China [J]. High Voltage, 2017, 2 (1): 1-10.
- [20] 魏晓光, 杨兵建, 汤广福 (Wei Xiaoguang, Yang Bingjian, Tang Guangfu). 高压直流断路器技术发展与实践 (Technical development and engineering applications of HVDC circuit breaker) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2017, 41 (10): 3180-3188.
- [21] Han X, Sima W, Yang M, et al. Transient characteristics under ground and short-circuit faults in a  $\pm 500$  kV MMC-based HVDC system with hybrid DC circuit breakers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33 (3): 1378-1387.
- [22] Far A J, Jovcic D. Design, modeling and control of hybrid DC circuit breaker based on fast thyristors [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33 (2): 919-927.
- [23] 魏晓光, 杨兵建, 贺之渊, 等 (Wei Xiaoguang, Yang Bingjian, He Zhiyuan, et al.). 级联全桥型直流断路器控制策略及其动态模拟试验 (Control strategy and physical dynamic simulation of cascaded full-bridge DC circuit breaker) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2016, 40 (1): 129-135.
- [24] 朱思丞, 赵成勇, 许建中 (Zhu Sicheng, Zhao Chengyong, Xu Jianzhong). 含多类型故障限流设备动作的直流电网保护时序配合 (Time-sequence coordination of protection in DC grid with multi-type fault current limiting devices) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2019, 43 (21): 195-207.

## Research on novel fault current limiting technology for MMC-HVDC system

TENG Shang-fu<sup>1,2,3</sup>, XIAO Li-ye<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Zhi-feng<sup>1,2</sup>,  
WEI Tong-zhen<sup>2,3</sup>, GONG Rui-lei<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Applied Superconductivity, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. Shandong Taikai High-voltage Switchgear Co., Ltd., Tai'an 271000, China)

**Abstract:** With the rapid development of flexible DC transmission technology based on modular multilevel converter, the method for breaking DC side short-circuit fault current has become the research focus. Fault current limiting technology can effectively restrain the rapid growth of DC fault current and provide favorable conditions for DC circuit breaker to isolate faults. In this paper, a novel current limiting circuit is proposed, which uses the discharge of capacitor combination to realize fault current limitation and combines with DC circuit breaker to realize the fast current limiting and breaking. The structure and principle of the circuit are described, and the design method of circuit parameters is given. The simulation models are established in MATLAB/Simulink, and the simulation results verify the effectiveness of the current limiting circuit.

**Key words:** MMC-HVDC; novel current limiting circuit; DC circuit breaker; fault current limiting; energy flow