

# 一种改进型限流式直流断路器拓扑

刘 进, 樊艳芳, 孙 瑶, 王亚强

(新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830017)

**摘 要:**针对目前已有混合式直流断路器拓扑中存在的成本高、故障工况下电流过大的问题,本文基于传统直流断路器拓扑提出一种改进型限流式直流断路器拓扑结构。该拓扑的限流支路在故障发生后接入电路,可有效限制故障电流上升;转移支路由晶闸管和 IGBT 串联组成,减小 IGBT 使用数量;采用预充电电容给晶闸管提供反压使其关断,并提出一种电容预充电方案。首先分析所提拓扑的工作原理,然后对其进行参数设计,最后在 PSCAD/EMTDC 中搭建仿真模型,与传统断路器拓扑进行对比,验证所提拓扑的可靠性和经济性。

**关 键 词:**直流断路器;限流电感;晶闸管;预充电电容

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.02.004 中图分类号: TM762 文章编号: 1673-9140(2023)02-0030-10

## An improved current-limiting DC circuit breaker topology

LIU Jin, FAN Yanfang, SUN Yao, WANG Yaqiang

(School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, China)

**Abstract:** In response to the problems of high cost and excessive fault current under fault conditions in existing hybrid DC circuit breaker topologies, this paper proposes an improved current limiting DC circuit breaker topology based on the existing traditional DC circuit breaker topology. The current-limiting branch of the topology was connected to the circuit after the fault occurred, effectively limiting the rise of fault current. The transfer branch consisted of thyristor and IGBT in series to reduce the number of IGBT. A pre-charged capacitor was used to provide the reverse voltage for the thyristor, and a pre-charged scheme was proposed. The operation principle was analyzed based on the proposed topology, and then the parameters were designed. Finally, a simulation model was built in PSCAD/EMTDC, compared with the breaker with traditional topology, to verify the reliability and economy of the proposed topology.

**Key words:** DC circuit breaker; current-limiting inductance; thyristor; pre-charged capacitor

基于电压源型换流器的高压直流输电(voltage source converter based high voltage direct current transmission, VSC-HVDC)也称柔性直流输电,凭借其供电可靠性、功率调节灵活、便于大规模风能光伏等新能源并网<sup>[1-2]</sup>等优势受到国内外学者的广泛关注,但直流系统阻尼低,故障电流上升迅速,且

直流电流没有自然过零点,使直流故障的快速清除<sup>[3-5]</sup>成为制约 VSC-HVDC 发展的主要因素之一。

直流断路器(direct current circuit breaker, DCCB)在快速清除故障的同时保证健全线路正常运行,是目前多端直流系统故障清除最有效的方案<sup>[6-7]</sup>。DCCB 一般分为机械式 DCCB、固态式 DCCB 和混

收稿日期: 2021-12-09; 修回日期: 2022-03-11

基金项目: 2022 天山英才培养计划(2022TSYCLJ0019); 新疆维吾尔自治区高校科研重点项目(XJEDU2021H009)

通信作者: 樊艳芳(1973—), 女, 博士, 教授, 主要从事新能源并网技术及电力系统保护与控制研究; E-mail: 410849062@qq.com

合式DCCB,其中混合式DCCB结合了前两者的优点,既能大容量低损耗地运行,也能快速清除故障电流<sup>[8]</sup>。

目前混合式DCCB一般使用全控型电力电子器件—绝缘栅双极型晶体管(insulate gate bipolar transistor, IGBT)。文献[9]介绍了ABB公司提出的混合式DCCB,稳态运行损耗低,故障电流清除速度快,但使用大量IGBT,成本过高,且对串联均压技术的要求很高。文献[10]提出一种基于IGBT串联技术的混合式DCCB,辅助开关采用反并联IGBT,双向开断故障电流,采用一个主分断开关,相比于ABB方案节约了IGBT数量,但没有解决大量IGBT串联可能出现不均压的问题。文献[11]提出一种混合式DCCB,采用全桥子模块,避免了大量IGBT串联带来的不均压问题,但较ABB方案使用更多IGBT,成本更高。相较于IGBT的串联技术,晶闸管的串联技术难度较低,工程应用也比较广泛。文献[12]提出的断路器拓扑其转移支路采用晶闸管和IGBT串联,减少了对IGBT的需求,减小了成本和技术难度,但是没有针对晶闸管半控特性给出晶闸管关断的方法。晶闸管属于半控型器件,需要承受反压才能关断。文献[13]采用由预充电容和电感组成的谐振电路来给晶闸管提供反压,但电容放电增加了主支路的故障电流上升率,增加了主支路的电流应力;文献[14]通过控制不同并联缓冲支路的导通延迟来给转移支路的晶闸管提供反压,但增加了太多元器件,经济性不足且控制较为复杂。

直流系统发生故障时电流上升过快,如何限制故障电流的快速上升也成为一研究重点。一般方法是在线路上安装电抗器,利用电感限流原理限制故障电流的快速上升。文献[12]提出一种限流式DCCB,在线路上设置限流电路,虽然达到了限流效果,但使得线路上的电感过大,不利于系统的稳定运行。文献[15]提出一种限流方法,在故障发生后将限流单元与断路单元一起投入工作,有效限制了故障电流的上升,但增加了大量元器件,经济性不足。

基于以上拓扑中存在的问题,本文在文献[12]的基础上进行改进,提出一种改进型限流式直流断

路器拓扑(current-limiting DC circuit breaker, CLCB),详细分析所提拓扑的结构和工作原理,给出参数设计原则,在PSCAD/EMTDC中搭建仿真模型,与现有拓扑进行对比,验证本文所提拓扑的优势。

## 1 限流式DCCB拓扑结构及工作原理

文献[12]提出一种限流式DCCB,拓扑结构如图1所示。

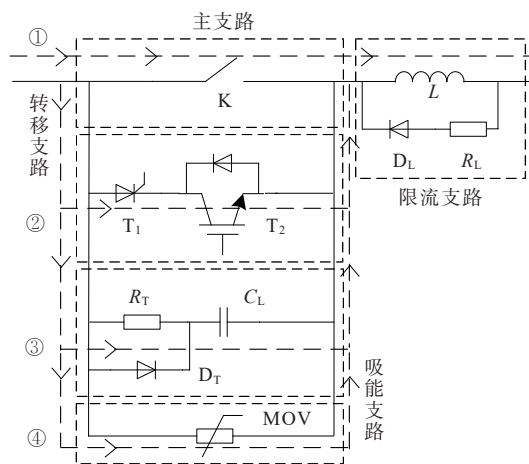


图1 限流式DCCB拓扑结构

Figure 1 Topology of current-limiting DCCB

该拓扑在线路上设置了限流电路,利用电感限流原理在故障发生后有效地限制了故障电流的上升,转移支路采用晶闸管和IGBT串联,充分利用晶闸管的经济性和IGBT的快速性,减小对IGBT的需求,降低转移支路的成本。

该拓扑的工作原理为:系统正常运行时,电流流通机械开关K;在故障发生后导通转移支路晶闸管 $T_1$ 和IGBT $T_2$ ,断开机械开关,故障电流换流至转移支路;待机械开关触头达到断开间距后,闭锁转移支路,故障电流换流至缓冲支路给电容 $C_T$ 充电;待电容两端电压达到避雷器(metal oxide varistors, MOV)动作条件时,电流换流至吸能支路,MOV动作切除故障电流。但该拓扑存在以下问题:

1) 系统正常运行时限流电路中的限流电感直接串入输电线路,导致系统的等效电感变大,可能会对系统的动态特性和控制保护的灵敏性产生影响,不利于系统安全可靠的运行;

2) 主支路仅采用一个机械开关,不能保证机械开关实现无弧分断;

3) 转移支路采用晶闸管和 IGBT 串联,没有针对晶闸管的半控特性给出关断方法;

4) 该拓扑不具备双向导通和分断电流以及重合闸的能力,在实际工程中很难应用;

5) 在参数设计方面,文献[12]没有给出相应的参数设计原则,例如限流电感的参数选取、缓冲电容的参数选取以及转移支路的晶闸管和 IGBT 数量配置设计原则。

## 2 改进型 CLCB 拓扑结构及工作原理

### 2.1 改进型 CLCB 拓扑结构及其优势分析

基于文献[12]所提拓扑存在的问题,本文提出一种改进型限流式直流断路器拓扑,其拓扑结构如图2所示。

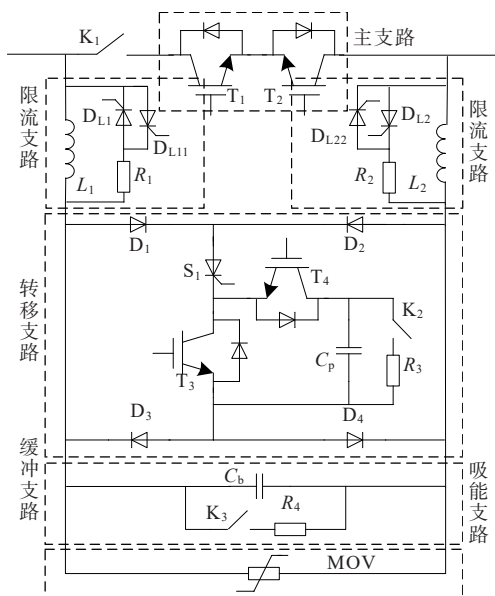


图2 改进型 CLCB 拓扑结构

Figure 2 Topology of improved CLCB

针对文献[12]所提断路器,文本所提断路器拓扑改进及优势如下。

1) 主支路由快速机械开关  $K_1$  和反向串联的 IGBT  $T_1$ 、 $T_2$  构成,系统正常运行时电流流通主支路,通态损耗低且可双向导通,在故障发生后利用强迫换流原理可以实现机械开关的无弧分断。

2) 限流支路由限流电感  $L_1$ 、 $L_2$  和反并联晶闸管

$D_{L1}$ 、 $D_{L11}$ 、 $D_{L2}$ 、 $D_{L22}$  及吸能电阻  $R_1$ 、 $R_2$  构成,将限流支路设计在断路器内部,系统正常运行时线路上呈现低阻抗特性,不会影响系统控制保护的灵敏性,在故障发生后,限流支路接入电路限制故障电流的快速上升,电路呈现高阻抗特性,对换流过程中的故障电流限制效果更好。

3) 转移支路增加预充电电容  $C_p$  为晶闸管  $S_1$  提供反压使其快速关断。针对预充电电容的充电问题,考虑充电电压的灵活可控性和充电装置的经济性,本文提出一种电容预充电方案,该方案以直流系统作为充电电源,通过已有线路对电容进行充电,电容充电电路如图3所示。

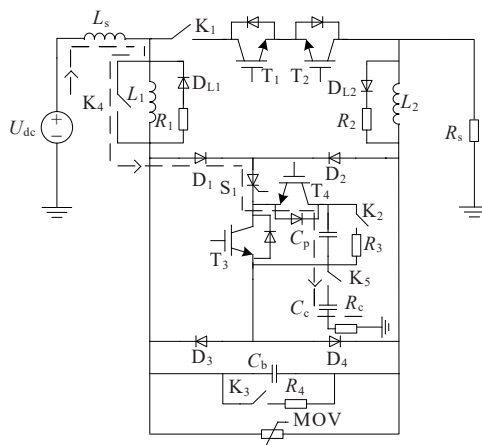


图3 电容充电电路

Figure 3 Circuit diagram of capacitor precharge

机械开关  $K_4$  和  $K_5$  为充电开关,也可以使用 IGBT 或晶闸管,本文以机械开关为例,  $C_c$  为可变电容器,用来钳位电容  $C_p$  的充电电压,  $R_c$  为限流电阻,用来限制充电过程中的电流冲击,通过调节电容  $C_p$  和  $C_c$  的容值比即可灵活调整电容充电电压。充电过程为:在系统稳态时,导通充电开关  $S_1$ 、 $K_4$ 、 $K_5$ ,直流电源通过线路给电容  $C_p$  充电,待  $C_p$  充满电后,断开充电开关  $K_4$ 、 $K_5$ ,充电回路没有电流,机械开关实现无弧分断,  $S_1$  自动退出运行,预充电电容  $C_p$  的充电电压表示为

$$U_{C_p} = \frac{1}{1 + \frac{C_p}{C_c}} U_{dc} \quad (1)$$

晶闸管在导通后,只有通过承受反压或外加反压电路才能关断。2种拓扑的晶闸管承受电压对比如图4所示。

文献[12]没有外加反压电路,不能保证晶闸管的完全关断,而本文所提拓扑增加了反压电路,在晶闸管需要关断的时候,导通  $T_4$ ,预充电电容给晶闸管提供反压使其关断。

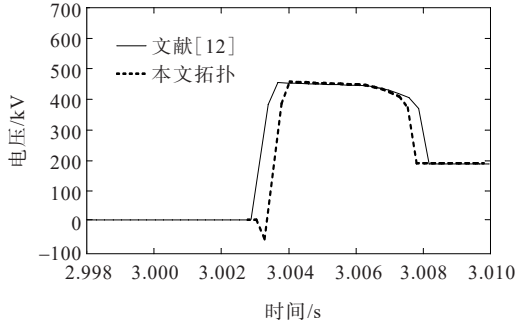


图 4 晶闸管电压对比

Figure 4 Comparison of thyristor voltage diagram

### 2.2 分闸工作原理

以故障发生在断路器右侧为例,保持晶闸管  $D_{L11}$ 、 $D_{L22}$  始终关断,晶闸管  $D_{L1}$ 、 $D_{L2}$  始终导通,可将其等效为二极管,电容  $C_p$  经过预充电建立起一定的电压,分闸各阶段工作过程如图 5 所示。

分闸工作原理如下:

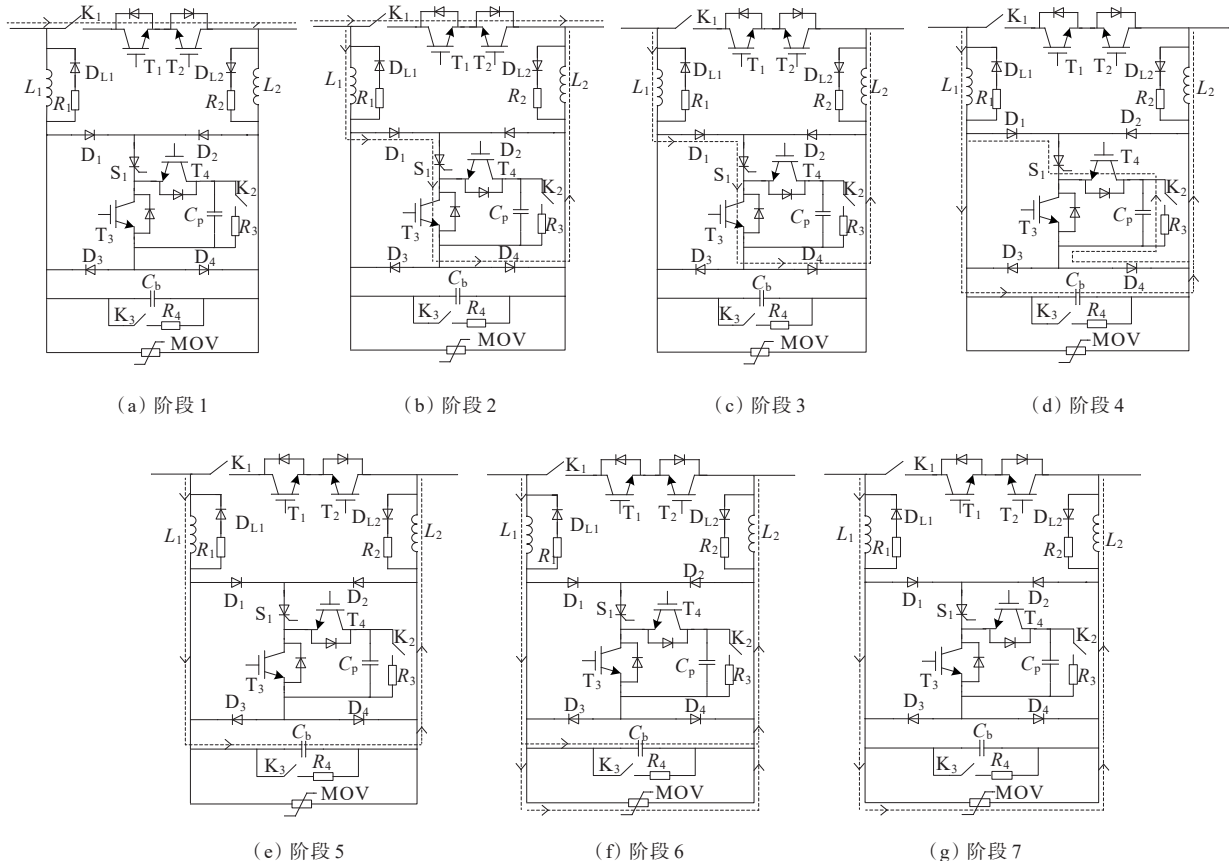


图 5 改进型 CLCB 分闸各阶段工作过程

Figure 5 Working process diagram of each stage of improved CLCB open

阶段 1(故障发生  $t_0-t_1$ )  $t_0$ 时刻之前系统正常运行,电流流过主支路,线路电流幅值小,通态损耗小, $t_0$ 时刻发生故障,故障电流持续上升,电流流向如图 5(a)所示;

阶段 2(第 1 次电流转移  $t_1-t_2$ )  $t_1$ 时刻系统检测到故障,给断路器发出动作信号,导通  $S_1$  和  $T_3$ ,关断  $T_1$ ,限流电感  $L_1$  和  $L_2$  接入电路限制故障电流的快速上升, $t_2$ 时刻,电流完全转移到转移支路,电流流向如图 5(b)所示;

阶段 3( $K_1$  延迟开断  $t_2-t_3$ ) 快速机械开关  $K_1$  实现无弧分断,但由于机械开关的特性,需要一定时间的延迟才能完全关断,电流流向如图 5(c)所示;

阶段 4( $S_1$  反压关断  $t_3-t_4$ )  $t_3$ 时刻,关断  $T_3$ ,导通  $T_4$ ,由于此时电容  $C_b$  两端只有很小的电压,而电容  $C_p$  已经通过预充电建立起一定的电压,所以  $S_1$  承受反压关断,电流流向如图 5(d)所示;

阶段 5(电压上升  $t_4-t_5$ )  $t_4$ 时刻, $S_1$  完全关断,故障电流完全转移到缓冲支路给电容  $C_b$  充电,电容  $C_b$  电压持续上升,电流流向如图 5(e)所示;

阶段6(第2次电流转移 $t_5-t_6$ )  $t_5$ 时刻,电容 $C_b$ 电压达到避雷器MOV动作电压,故障电流向吸能支路转移, $t_6$ 时刻,故障电流完全转移到吸能支路,电流流向如图5(f)所示;

阶段7(能量吸收 $t_6-t_7$ ) MOV两端电压大于直流电源电压,使故障电流下降, $t_7$ 时刻,故障电流下降为零,故障完全切除,电流流向如图5(g)所示。

本文所提拓扑具有双向导通和分断电流的能力,故障发生在断路器左侧时其工作原理相同,仅是导通开关不同,例如正常运行时导通 $T_2$ ,保持晶闸管 $D_{L1}$ 、 $D_{L2}$ 始终关断,保持晶闸管 $D_{L11}$ 、 $D_{L22}$ 始终导通。

### 2.3 重合闸工作原理

由分闸工作原理可知,在晶闸管完全关断后,故障电流完全转移至缓冲支路给缓冲电容充电,此时限流支路的电感电流和故障电流会有短暂上升的过程,随后电流开始下降,限流电感 $L_1$ 、 $L_2$ 产生感应反电动势使得 $D_{L1}$ 、 $D_{L2}$ 导通,电感中的能量通过 $R_1$ 、 $R_2$ 释放。在故障电流清除后,导通开关 $K_2$ 、 $K_3$ ,电容通过 $R_3$ 、 $R_4$ 放电,一段时间后放电完成,关断 $K_2$ 、 $K_3$ ,为下一次断路器工作做好准备。

重合闸操作过程如下:保持主支路机械开关 $K_1$ 和IGBT组关断,导通转移支路 $S_1$ 和 $T_3$ ,检测流过转移支路的电流是否上升,若检测到电流上升,则说明仍存在故障电流,则关断 $S_1$ 和 $T_3$ ,故障电流流向缓冲支路,然后通过MOV吸收能量;若此时电流没有上升,则在500 ms后重新进行合闸操作,在进行几次重合闸操作后,若依旧没有检测到故障电流,则说明故障已经清除,此时再导通 $K_1$ 和 $T_1$ ,使直流系统恢复正常运行。

## 3 断路器参数设计

对称双端双极直流系统如图6所示。直流系统线路故障一般分为单极接地故障和双极短路故障,故障发生后相应的直流断路器动作切除故障。本文以发生单极接地短路故障为例重点讨论直流断路器的切断电流能力,故将直流系统简化,如图7所示。

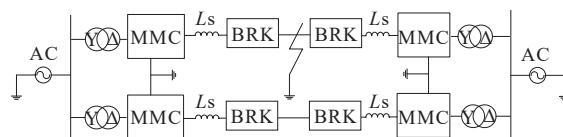


图6 对称双端双极直流系统

Figure 6 Symmetrical double ended bipolar DC system

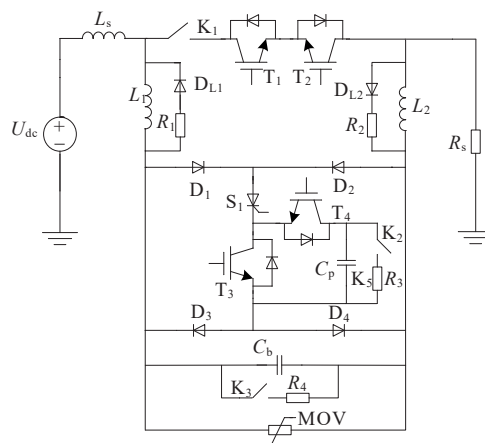


图7 直流系统简化示意

Figure 7 Simplified diagram of DC system

### 3.1 限流电感参数设计

本文所提拓扑的限流支路设计在断路器内部,为了保证限流效果,电流换流过程中的电流峰值 $i_{dcmax}(t > t_1)$ 需要低于主支路断开瞬间的电流 $i_{dc}(t_1)$ ,即

$$i_{dcmax} < i_{dc}(t_1) \quad (2)$$

从故障发生到断路器动作这段时间的电流表示为

$$i_{dc}(t) = \frac{U_{dc}}{R_s} + [i_{dc}(t_0) - \frac{U_{dc}}{R_s}] e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3)$$

其中, $\tau = \frac{L_s}{R_s}$ , $L_s$ 为线路电抗器, $R_s$ 为等效电阻,将 $t=t_1$ 代入式(3)可得 $i_{dc}(t_1)$ 。

换流过程中的电流峰值出现在缓冲电容充电至系统电压时,缓冲电容充电过程等效电路如图8所示。

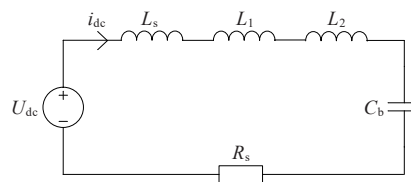


图8 缓冲电容充电过程等效电路

Figure 8 Equivalent circuit diagram of buffer capacitor charging process



该过程电压电流表示为

$$\begin{cases} LC_b \frac{d^2 U_{c_b}}{dt^2} + R_s C_b \frac{dU_{c_b}}{dt} + U_{c_b} = U_{dc} \\ i_{dc} = C_b \frac{dU_{c_b}}{dt} \end{cases} \quad (4)$$

初始条件为

$$\begin{cases} U_{c_b}(0_+) = U_{c_b}(0_-) = 0 \\ i_{dc}(0_+) = i_{dc}(0_-) = i_{dc}(t_3) \end{cases} \quad (5)$$

则

$$U_{c_b}(t) = U_{dc} \times \left[ 1 - e^{-\delta t} \frac{\omega_0}{\omega} \sin(\omega t + \beta) \right] \quad (6)$$

$$i_{dc}(t) = \frac{U_{dc}}{\omega L} e^{-\delta t} \sin(\omega t) \quad (7)$$

其中,

$$\begin{cases} \delta = \frac{R_s}{2L} \\ \omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \\ \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_b}} \\ \beta = \arctan\left(\frac{\omega}{\delta}\right) \\ L = L_s + L_1 + L_2 \end{cases} \quad (8)$$

将  $U_{c_b} = U_{dc}$  代入式(6)可得电流峰值出现的时间  $t$ , 再将时间  $t$  代入式(7)可得  $i_{dcmax}$  与电感  $L$  的关系式, 再联立式(2)可得限流电感的最小约束条件为 20 mH。

在 PSCADA/EMTDC 仿真软件中搭建如图 7 所示的仿真模型, 设定直流系统电压  $U_{dc}$  为 320 kV, 线路电抗器  $L_s$  为 100 mH, 等效电阻  $R_s$  为 56  $\Omega$ , 则额定电流  $i_{den}$  为 5 kA, 保持电容值不变, 改变限流电感值, 观察不同限流电感值对故障电流的影响, 不同电感值下的电流波形如图 9 所示。

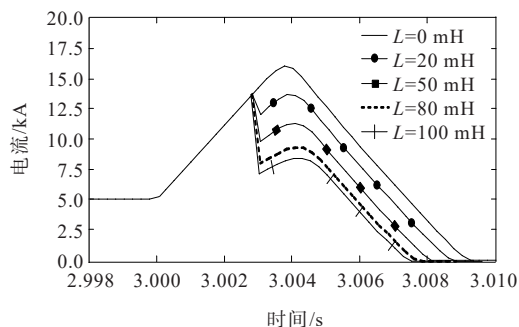


图9 不同限流电感值下电流波形

Figure 9 Current waveform in various current limiting inductance values

由图 9 可以看出, 限流电感取值越大, 电流换流过程中的峰值越小, 限流效果越好, 但电感取值越大, 其存储的能量越多, 放电时间越长, 不利于断路器的快速重合闸, 结合图 8 综合考虑选取限流电感值为 80 mH。

### 3.2 转移支路参数设计

转移支路采用晶闸管阀组和 IGBT 阀组串联组成, 由于晶闸管承压能力相较 IGBT 更强且串联技术成熟, 所以尽量增加晶闸管数量, 让晶闸管阀组多承受电压, 减少 IGBT 承压, 减少数量。

设断路器在分闸过程中承受的峰值电压为  $U_{max}$ , 该值取决于 MOV 的动作电压  $U_{MOV}$ , 晶闸管承受的峰电压为  $U_{SCR}$ , IGBT 承受的峰值电压为  $U_{IGBT}$ , 该值取决于并联在 IGBT 两端的电容电压值  $U_{c_p}$ , 为了保证系统和器件的安全, 则有

$$U_{max} < U_{SCR} + U_{IGBT} \quad (9)$$

在一个选定系统电压等级、避雷器动作电压的固定断路器应用场合, 设定晶闸管承受的电压, 在选取晶闸管的型号参数后, 就可以确定晶闸管的使用数量, 根据式(9)确定合适的电容电压值  $U_{c_p}$ , 在选取 IGBT 的型号参数后即可确定 IGBT 的使用数量, 再根据式(1)可以确定电容  $C_p$  的取值。

### 3.3 缓冲电容参数设计

由上文断路器分闸工作原理分析可知, 在转移支路晶闸管和 IGBT 关断过程中, 快速机械开关由于其特性可能还处于断开的阶段, 此时缓冲电容充电电压由快速机械开关  $K_1$  和主支路 IGBT  $T_1$  共同承受, 需要保证快速机械开关不会重燃, 快速机械开关的电弧击穿电压  $U_K$  与间隙长度  $d$  有关, 关系式为  $U_K = k^{0.5}d$ , 设主支路 IGBT 承受的最大电压为  $U_{T_1}$ , 且需要保证断路器在 3~5 ms 时切除故障电流, 则缓冲电容  $C_b$  的约束条件为

$$\begin{cases} U_{MOV} < U_{c_b}(t) < U_K + U_{T_1} \\ 0.5 < t < 2 \end{cases} \quad (10)$$

将式(6)和式(8)代入约束条件可得  $C_b$  的取值范围为 10~30  $\mu F$ , 在不同电容值下的 MOV 动作时间和吸收能量如图 10、11 所示, 可以看出,  $C_b$  取值越小, MOV 动作越快, 故障电流切除越快, 但 MOV 吸收的能量也越多, 所以在约束范围内综合选取  $C_b$  值为 20  $\mu F$ 。

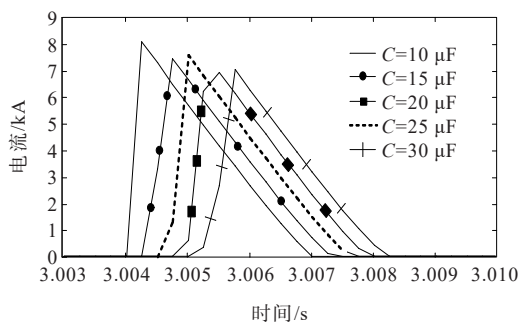


图 10 MOV 支路电流波形

Figure 10 MOV branch current waveform

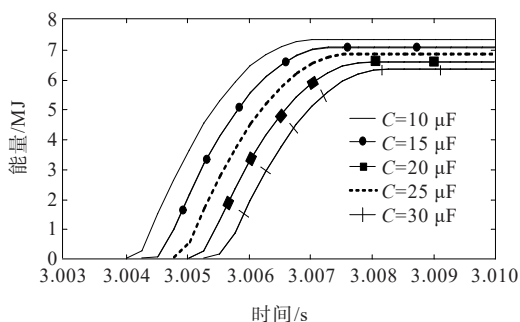


图 11 MOV 吸收能量

Figure 11 MOV absorption energy diagram

表 1 系统参数

Table 1 System parameters

参数	单位	数值
直流系统电压 $U_{dc}$	kV	320
线路电感 $L_s$	mH	100
线路电阻 $R_s$	$\Omega$	64
避雷器额定电压	kV	320
避雷器动作电压	kV	640
限流电感 $L_1, L_2$	mH	40
缓冲电容 $C_b$	$\mu\text{F}$	20
预充电电容 $C_p$	$\mu\text{F}$	30
钳位电容 $C_c$	$\mu\text{F}$	30
限流电阻 $R_c$	$\Omega$	10
吸能电阻 $R_1, R_2, R_3, R_4$	$\Omega$	10

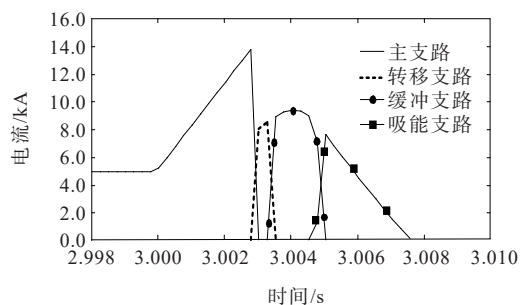


图 12 电流波形

Figure 12 Current waveform

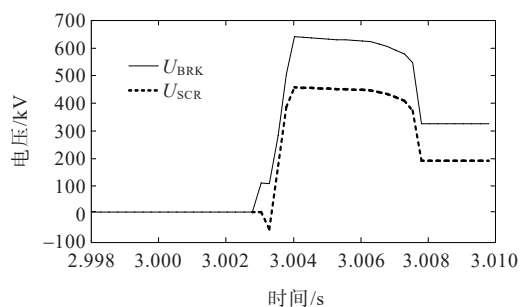


图 13 电压波形

Figure 13 Voltage waveform

## 4 仿真验证及方案对比

### 4.1 仿真验证

在PSCAD/EMTDC中搭建图7所示的仿真模型,以发生单极接地故障为例,系统参数如表1所示。断路器工作过程电流波形和电压波形如图12、13所示。

由图12可以看出,系统在3s时发生故障,3.003s时断路器动作,导通 $S_1, T_3$ ,关断 $T_1$ ,故障电流换流至转移支路,待主支路电流为零时,关断 $T_3$ ,导通 $T_4, C_p$ 给 $S_1$ 提供反压使其关断,然后电流换流至缓冲支路给 $C_b$ 充电,待 $C_b$ 两端电压达到MOV动作条件,电流转移至吸能支路,故障电流开始衰减,最终在3.0075s时为零。

由图13可以看出,晶闸管承受了大约350 $\mu\text{s}$ 的反压后可靠关断,验证了本文所提的晶闸管关断方法,且在整个断路器工作过程中晶闸管承受了大部分电压,大大减小了对IGBT的需求。

### 4.2 方案对比

将本文所提拓扑、文献[12]所提拓扑和ABB拓扑<sup>[8]</sup>以及模块化全桥拓扑<sup>[10]</sup>进行对比,ABB拓扑和全桥拓扑如图14、15所示。将4种拓扑进行仿真,保持系统参数一致,其中文献[12]和本文所提拓扑的限流电感取值一样,电流开断波形如图16所示,可以看出,4种拓扑在电流转移过程有着很大差别,由于文献[12]所提拓扑在线路上串联了限流电感,

所以在故障发生到主支路断开这段时间的电流上升率相较于其他 3 种方案较低,在主支路断开后,由于本文拓扑在断路器内部设计了限流电路,所以在电流换流过程中的故障电流相较于其他 3 种拓扑大大减小,峰值为 9.33 kA,电流开断时间也优于其他 3 种拓扑,为 4.75 ms。

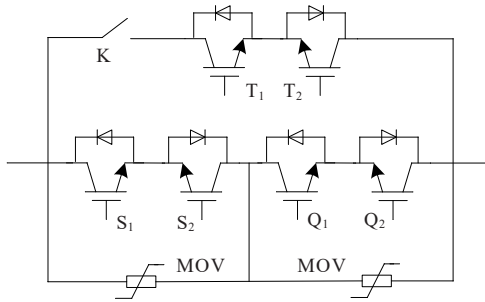


图 14 ABB 拓扑结构

Figure 14 Topology diagram of ABB

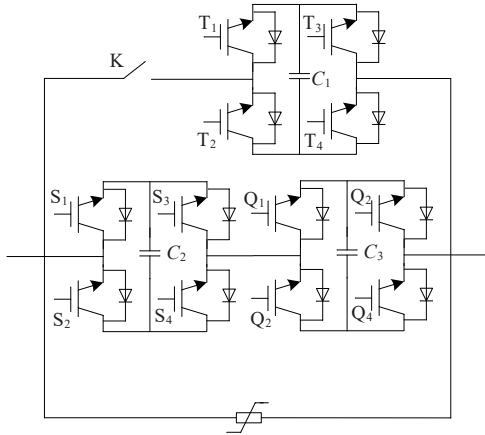


图 15 全桥拓扑结构

Figure 15 Topology diagram of full bridge

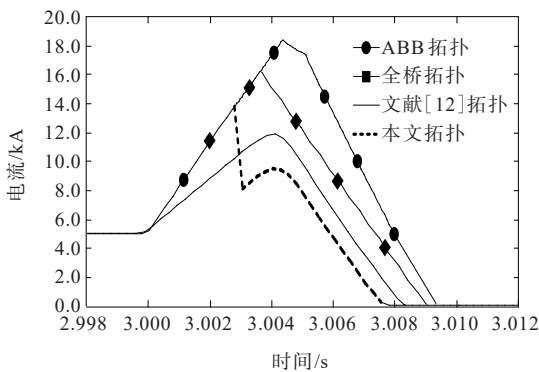


图 16 4 种拓扑电流开断对比

Figure 16 Comparison of current circuit of four types of topologies

4 种拓扑的 MOV 吸能如图 17 所示,由于 ABB 拓扑和全桥拓扑没有限流装置和缓冲电路,所以在故障发生后的故障电流很大,导致 MOV 吸收的能量也很多,其中 ABB 拓扑采用分布式投入 MOV,在一定程度上可以减少单个 MOV 的吸能,但总体吸能还是很高,而文献[12]所提拓扑和本文所提拓扑增加了限流装置和缓冲电路,MOV 吸能较其他两种拓扑较小,但本文所提拓扑在电流转移过程中对故障电流的限制更好,所以 MOV 吸收的能量更少,仅为 7 MJ。

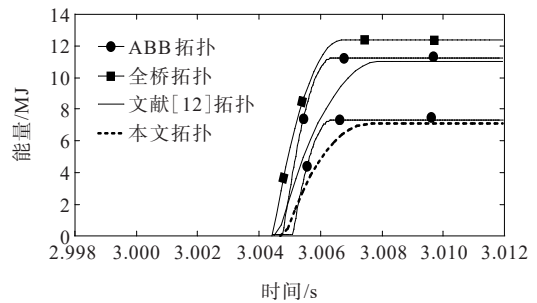


图 17 4 种拓扑 MOV 吸能对比

Figure 17 Comparison of MOV energy absorption of four types of topologies

在成本方面,4 种方案的主支路成本差异不大,在转移支路上有着很大差别,ABB 方案的转移支路采用大量 IGBT 直接串联而成,模块化全桥方案采用 IGBT 全桥模块串联,而文献[12]和本文所提拓扑的转移支路采用混合开关即晶闸管阀组和 IGBT 阀组串联,在断路器工作过程中,ABB 方案和模块化全桥方案中的 IGBT 承受全部电压,因此 IGBT 的使用数量较多,而文献[12]和本文所提拓扑让承压能力更强且成本较低的晶闸管承受断路器分闸过程中的大部分电压,让 IGBT 承受更少的电压,减小 IGBT 的数量,降低成本。

IGBT 选型为 ABB 公司的 4.5 kV/3 kA 压接式 IGBT,由于晶闸管的耐流能力更强,可选择 4.5 kV/1.5 kA 的快速晶闸管。4 种拓扑转移支路成本如表 2 所示,这里考虑实现电流的双向流通,所以器件的使用数量需要翻倍,而本文拓扑使用二极管组实现电流的双向流通,仅需要使用实现单向导通的器件数量,成本更低。



表2 4种拓扑转移支路成本对比

Table 2 Cost comparison of four topologies to transfer branch

方案	$U_{IGBT}/kV$	$U_{SCR}/kV$	$i_{转移支路}/kA$	IGBT/只	晶闸管/只
ABB拓扑	640	0	18.12	1 716	0
全桥拓扑	640	0	16.22	1 716	0
文献[12]	182.8	454.3	10.68	384	800
本文拓扑	183	448.5	8.42	182	300

文献[12]和本文所提拓扑转移支路使用的IGBT数量远远小于ABB拓扑和全桥拓扑,虽然使用了晶闸管,但在相同功率等级下,晶闸管的价格只有IGBT的五分之一。本文所提拓扑为了实现机械开关的无弧分断,在主支路上比文献[12]所提拓扑多增加了反向串联的IGBT组,但主支路的通态损耗低,所以并不会使用太多IGBT;为了解决晶闸管的关断问题,本文所提拓扑在转移支路设计上比文献[12]所提拓扑多增加了反压电路,多使用了IGBT,但本文所提拓扑的限流效果较文献[12]所提拓扑更好,所以在转移支路的成本上优于文献[12]所提拓扑,且本文所提拓扑还具有双向导通和分断电流以及重合闸的能力。4种方案的总体性能对比如表3所示。

表3 4种方案总体性能对比

Table 3 Comparisons of overall performances of the four schemes

方案	分断时间	避雷器吸能	技术难度	总成本
ABB拓扑	长	多	高	高
全桥拓扑	较长	多	低	高
文献[12]	短	较多	低	低
本文拓扑	最短	最少	低	最低

综上,本文所提拓扑具有明显优势。

## 5 结语

本文在已有拓扑基础上提出一种改进型限流式直流断路器拓扑,其限流部分在发生故障后接入电路,限制故障电流的上升,其转移支路采用晶闸管和IGBT串联组成,在断路器工作过程中,晶闸管承受大部分电压,IGBT承受较小的电压,减小对

IGBT数量的需求,降低转移支路的成本。针对晶闸管的半控特性问题,提出让并联在IGBT两端的预充电电容给晶闸管提供反压的方法,并提出一种电容预充电方充案,充电电路结构简单。在PSCAD/EMTDC中搭建320 kV等效直流系统仿真模型,进行仿真验证并与现有方案进行对比,结果表明本文所提拓扑在电流开断方面和成本方面有显著提升。

## 参考文献:

- [1] 朱金涛,辛业春. 柔性高压直流输电仿真技术研究方法综述[J]. 智慧电力,2021,49(3):1-11+94.  
ZHU Jintao, XIN Yechun. Review of research on simulation methods of VSC-HVDC transmission system[J]. Smart Power,2021,49(3):1-11+94.
- [2] 王珍意,黄文杰,赵川,等. 含分布式电源的中压柔性直流配电网研究[J]. 电力科学与技术学报,2020,35(1):102-108.  
WANG Zhenyi, HUANG Wenjie, ZHAO Chuan, et al. Research on flexible medium voltage DC distribution network with distributed generation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2020,35(1):102-108.
- [3] 杨岳峰,王晓晗,王玮,等. 柔性直流换流阀监视系统关键技术及工程化应用[J]. 中国电力,2021,54(4):168-174.  
YANG Yuefeng, WANG Xiaohan, WANG Wei, et al. Key technologies and engineering application of converter valve monitoring system for flexible HVDC[J]. Electric Power,2021,54(4):168-174.
- [4] 吕承,邵能灵,郑晓冬,等. 基于边界电流的柔性直流线路保护新方案[J]. 电力科学与技术学报,2020,35(1):115-121.  
LÜ Cheng, TAI Nengling, ZHENG Xiaodong, et al. Protection novel scheme for flexible DC line based on boundary current[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2020,35(1):115-121.
- [5] 吴跃斌,祁天星,马涛,等. 直流微电网故障限流特性分析[J]. 电网与清洁能源,2021,37(6):18-28+34.  
WU Yuebin, QI Tianxing, MA Tao, et al. Analysis of fault current limiting characteristics of DC microgrid[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(6): 18-28+34.
- [6] 王晓晨. 高压直流断路器发展研究综述[J]. 湖北电力,2018,42(4):7-11.  
WANG Xiaochen. Review on development of HVDC

- circuit breaker[J]. Hubei Electric Power, 2018, 42(4): 7-11.
- [7] 何俊佳,袁召,赵文婷,等. 直流断路器技术发展综述[J]. 南方电网技术, 2015, 9(2): 9-15.  
HE Junjia, YUAN Zhao, ZHAO Wenting, et al. Review of DC circuit breaker technology development[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(2): 9-15.
- [8] 余占清,曾嵘,屈鲁,等. 混合式直流断路器的发展现状及展望[J]. 高电压技术, 2020, 46(8): 2617-2626.  
YU Zhanqing, ZENG Rong, QU Lu, et al. Development status and prospect of hybrid DC circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2617-2626.
- [9] HAFNER J, JACOBSON B. Proactive hybrid HVDC breakers—a key innovation for reliable HVDC grids[C]// CIGRE Session, Bologna, Italy, 2011.
- [10] 张恽宁,罗易萍,洪妍妍. 基于多端口混合直流断路器的LCC-VSC混合多端直流输电系统故障清除方案[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 146-153.  
ZHANG Yining, LUO Yiping, HONG Yanyan. Multi-port DC circuit breaker-based fault clearing scheme for LCC-VSC hybrid multi-terminal HVDC systems[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 146-153.
- [11] 魏晓光,周万迪,张升,等. 模块化混合式高压直流断路器研究与应用[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 2038-2047.  
WEI Xiaoguang, ZHOU Wandi, ZHANG Sheng, et al. Research and application of modular hybrid HVDC circuit breaker[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineer, 2020, 40(6): 2038-2047.
- [12] 程显,闫冬冬,葛国伟,等. 基于耦合电抗器的阻容型混合直流断路器拓扑结构研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(3): 818-827.  
CHENG Xian, YAN Dongdong, GE Guowei, et al. Research on the topology of the resistance-capacitance hybrid DC circuit breaker with coupling reactors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(3): 818-827.
- [13] 陈羽,石巍,杨兵,等. 混合式高压直流断路器控制保护系统[J]. 电力工程技术, 2021, 40(5): 164-170+199.  
CHEN Yu, SHI Wei, YANG Bing, et al. Hybrid HVDC circuit breaker control and protection system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(5): 164-170+199.
- [14] DAVIDSON C C, WHITEHOUSE R S, BARKER C D. A new ultra-fast HVDC circuit breaker for meshed DC networks[C]// 11th IET International Conference on AC and DC Power Transmission, Birmingham: IET, 2015.
- [15] 熊迪,谭亲跃,丁月明,等. 一种高压限流混合式直流断路器拓扑及参数优化研究[J]. 高压电器, 2022, 58(9): 37-44.  
XIONG Di, TAN Qinyue, DING Yueming, et al. Study on topology and parameter optimization of high voltage current limiting hybrid DC breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(9): 37-44.

(上接第17页 = Continued from page 17)

- [15] 张衡,张沈习,程浩忠,等. Stackelberg博弈在电力市场中的应用研究综述[J]. 电工技术学报, 2022, 37(13): 3250-3262.  
ZHANG Heng, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, et al. A state-of-the-art review on stackelberg game and its applications in power market[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(13): 3250-3262.
- [16] FANTI L, GORI L. The dynamics of a differentiated duopoly with quantity competition[J]. Economic Modelling, 2012, 29(2): 421-427.
- [17] 丁毅宏,檀勤良,郑锦,等. 市场交易下电力联合外送多主体利益分配优化[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(11): 31-38+46.  
DING Yihong, TAN Qinliang, ZHENG Jin, et al. Optimization of multi-agent benefit distribution of power combined transmission under market transaction[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(11): 31-38+46.
- [18] 安学娜,张少华,李雪. 考虑绿色证书交易的寡头电力市场均衡分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 84-89.  
AN Xuena, ZHANG Shaohua, LI Xue. Equilibrium analysis of oligopolistic electricity markets considering tradable green certificates[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 84-89.