

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2022.09.005

一种高压限流混合式直流断路器拓扑及参数优化研究

熊迪¹, 谭亲跃¹, 丁月明², 康定毅¹, 庞博文¹, 刘政光¹

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 咸阳 712100; 2. 国网山东省
电力公司日照供电公司, 山东 日照 276800)

摘要: 随着我国高压直流输电技术的不断发展, 短路故障电流值也随之增加。针对直流电网中短路大电流开断这一难题, 文中基于直流短路故障时断路器的工作原理研究, 对短路电流采用先限流、再关断的方案, 提出了一种利用限流电路进行两次限流的混合式断路器拓扑。同时, 研究了限流电路参数的选取对断路器工作性能的影响, 并对相关参数进行了优化。在仿真研究和理论分析的基础上, 与没有第二次限流的断路器进行了比较。结果表明, 该断路器可通过两次限流成功将电流限制住并在故障发生的5 ms内关断, 同时该断路器拓扑优化后的开断能力和能量吸收能力有了较好的提升, 对于保证直流系统的安全性和稳定性有良好的理论和应有价值。

关键词: 直流电网; 混合式直流断路器; 拓扑优化; 限流

Study on Topology and Parameter Optimization of High Voltage Current Limiting Hybrid DC Breaker

XIONG Di¹, TAN Qinyue¹, DING Yueming², KANG Dingyi¹, PANG Bowen¹, LIU Zhengguang¹

(1. Northwest A&F University, College of Hydraulic and Architectural Engineering, Shaanxi Xianyang 712100, China; 2. State Grid Shandong Rizhao Power Supply Company, Shandong Rizhao 276800, China)

Abstract: With the continuous development of HVDC transmission technology in China, the short-circuit fault current increases accordingly. In view of the difficulty of short circuit high current interruption in the DC power grid, the hybrid circuit breaker topology with current limiting circuit for two-time current limitation is proposed on the basis of the study of the operating principle of circuit breaker in case of DC short circuit fault and the proposal of current limiting first and then breaking. At the same time, the influence of selection of current limiting circuit parameters on performance of circuit breaker is studied and related parameters are optimized. On the basis of simulation study and theoretical analysis, it is compared with the circuit breaker without second current limiting. The results show that the circuit breaker can successfully limit the current by limiting the current twice and, in case of fault, break within 5 ms. Meanwhile, the interruption capacity and energy absorption ability of the circuit breaker after topological optimization has good improvement, which has good theoretical and application for ensuring the safety and stability of DC system.

Key words: DC grid; hybrid DC circuit breaker; topology optimization; current limitation

0 引言

近年来, 基于柔性直流技术的直流电网有效解

决了大规模分布式光伏和风电的并网运行问题, 提高了电网的输电能力及供电稳定性^[1-3]。然而高压直流的开断技术的未成熟严重制约了直流电网的

收稿日期: 2022-05-20; 修回日期: 2022-07-21

基金项目: 国家电网公司总部科技项目(5400-202216167A-1-1-ZN)。

Project Supported by State Grid Corporation Headquarters Science and Technology Project (5400-202216167A-1-1-ZN).

发展^[4]。由于直流电网的低惯性和低阻尼,发生短路故障后电流会在几毫秒内迅速上升,危及电网的设备安全^[5-7],所以可快速有效隔离故障部分的高压直流断路器得以受到广泛关注^[8-9]。而仅通过增加线路电抗器来抑制电流上升速率会使电网的动态行为受到影响,不能实现电流的有效开断^[10]。且电抗较大时电压源、电流源转换器也将关闭^[11],影响系统的安全稳定。混合式高压直流断路器的性能参数主要受制于电子器件^[12-14],降低性能要求并简化拓扑结构,成为了电力系统的迫切需求^[15-16]。现阶段主要限流方案分为超导限流^[17-21]和电力电子器件限流。超导限流仍受限于材料和成本,并未得以在工业中广泛推广。因而主要通过限流电路来限制短路故障电流的增长速率,从而降低开断电流的大小。

高压直流断路器可按主关断开关不同分为机械式、全固态式和混合式^[22-24]。其中混合式兼具了机械式的高耐压和固态式关断速度快的优点,受到广泛关注,因此文中的主要工作针对混合式断路器。针对直流线路故障清除速度慢的问题,文[25]提出了一种具备限流能力的混合式直流断路器,但结构的操作复杂,关断时间长;文[26]提出了主断路器和几个分支断路器组合的限流断路器方案,有效限制了电流值和电流上升率,但电子器件过多,成本高;文[27-28]在混合直流断路器的换流回路加了限流电路,可以限制电流上升率,但电阻和电感并联会增加关断电流的峰值,延迟关断时间。

文中结合混合式限流器的优点,并针对高电压等级故障电流大及上升快的问题,提出了一种新型限流断路器拓扑。利用电容充能将电流二次换流至限流电阻和限流电感结合的限流电路,抑制了故障电流的峰值,降低关断的性能要求;同时充能后电容开始释放电流,流过电感的电流进一步增大,使电感的限流能力进一步提高。该断路器通态损耗低,限流能力显著,可有效降低对避雷器吸能力要求,且限流电路并未直接接入电网,不会对电网造成影响。通过与主流断路器拓扑方案进行仿真比较,验证了该拓扑结构的优越性和鲁棒性。该优化拓扑结构对于促进大规模的新型能源消纳、电网柔性互联,具有重要意义。

1 限流式混合直流断路器

1.1 拓扑结构

该限流式直流断路器的拓扑结构见图1。主要由3个分支组成:分支1是低耗能的通流支路,分支

2是由电力电子开关和限流电路组成的换流支路,分支3是能量吸收支路。通流支路与传统的直流断路器相同,由快速机械开关和LCS组成,实现电流的双向流通及换流功能。换流支路中采用多组IGBT串联分压并负责迅速关断故障电流,并串联一个由电容 C 、电感 L 以及小电阻 R 组成的限流电路。限流电路在直流断路器中主要用途是在断路器换流过程中构造一个缓冲电路,帮助降低 di/dt 和抑制电流尖峰,实现大电流分断能力。氧化锌避雷器构成的吸能支路可以在短时间内将电路中剩余的故障能量吸收,同时也为转移支路电子开关提供限压和限流保护。

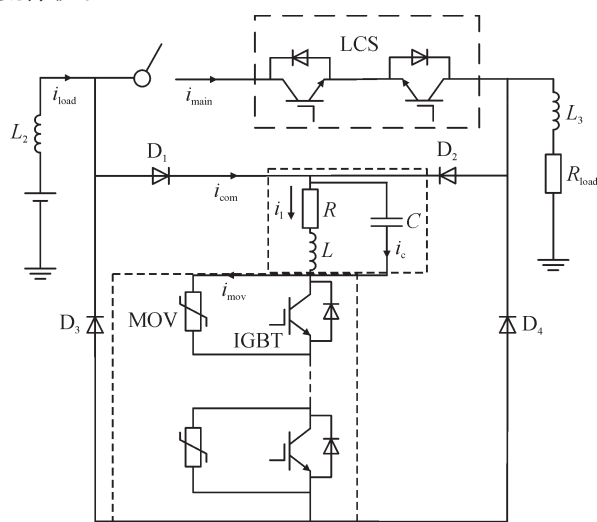


图1 限流断路器拓扑结构

Fig. 1 Topology of current limiting circuit breakers

1.2 工作原理

正常运行时,机械开关 K 闭合,反串联的IGBT导通,电流通过机械开关,通态损耗低。断路器当直流断路器发现可疑故障时,为加快开断速度,先将电流转移到换流支路,确认故障后,可以迅速执行断路操作。具体过程为:先导通所有换流支路的IGBT,然后关断通流支路的IGBT,其缓冲电路充电并产生电压,将从机械开关到主直流断路器的电流进行换向;当电流全部转移到换流支路时,通流支路电流过零,机械开关无弧分断。当机械开关完全打开时,闭锁换流支路的IGBT,机械开关承担了混合型直流断路器的大部分电压,因此LCS只需要较低的额定电压。同时换流支路的电压迅速升高,当支路两端的电压上升到 ZnO 的动作阈值时,吸能支路将电压限制到预定水平并吸收掉电路中剩余的能量。

文中在混合式直流断路器的拓扑结构中引入图1的限流电路,与混合式直流断路器的典型结构

不同,由于 RL 支路相当于阻感负载,电流先换流到电容 C 支路。电容 C 在未充满时相当于短路,短路电流换流到换流支路时可以视作电流完全转移到 C 支路,这样也可以避免因加入限流回路对初次换流产生的影响。随着电容储存的能量趋于饱和,电容电流逐渐衰减为零,电流二次换流到 RL 支路。换流过程中由于电感 L 和电阻 R 的存在, RL 支路电流上升速率低于 C 支路电流衰减速度,故障电流被较好的限制。当电容充电完成后开始对 RL 支路反向放电,通过电感 L 的电流增加,使电感的限流效果进一步提高,直到电容放电电流开始减小。之后故障电流在电容放电结束前关闭,电容吸收部分回路中的能量,然后电容电流在 RLC 回路呈衰减振荡状态消耗储存的能量。同时将平波限流电感一分为二,分别安装在断路器两端,进一步限制短路电流上升速率,将断路器的关断电流限制在可接受范围,增加了断路器分断大电流的能力,也有助于减小避雷器需求的吸能功率。避雷器吸收能量的减少,在一定程度上缩短了避雷器吸收能量所用的时间,弥补了因为大电感造成的吸能支路电流衰减速度慢的缺点,使断路器能在满足要求的时间内关断的同时又兼具限流效果。该断路器运用于实际时也应该注意,在限流回路使用电阻可以有效限制短路电流的幅值,但也对电阻提出了很高的要求。但阻值的选取对整体开关特性影响较小,可考虑多种因素灵活选择。

2 动作过程瞬态分析及参数设计

2.1 动作过程瞬态分析

直流断路器开断过程电流波形见图2。图2中: i_{dc} 、 i_{main} 、 i_{com} 、 i_L 、 i_c 、 i_{mov} 分别表示负载侧电流、通流支路电流、换流支路电流、 RL 支路电流和 C 支路电流。正常运行时,电流流过机械开关和LCS,见图3(a)。短路发生时,直流断路器分断工作过程可以分为4个阶段:①为发生短路故障到电流上升至断路器动作设定值的阶段;②换流支路提前导通,部分电流流过换流支路;③载流支路固态开关闭,断路器换流,机械断路器零电流分断;④分断载流支路固态开关,电压达到避雷器动作阈值,非故障侧电流衰减为0,分断完成。

下面对动作过程进行分析。

2.1.1 短路阶段

设回路中的故障电流为 i_d ,到达断路器动作阈值的电流为 I_s , R_a 、 R_{load} 、 L_s 分别为线路电阻、系统电阻和杂散电感。

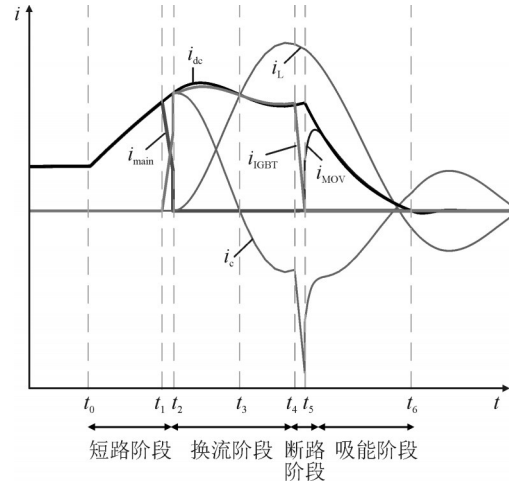


图2 直流断路器开断过程电流波形

Fig. 2 Current waveform of DC circuit breaker during disconnection

电流 i_d 的表达式为

$$i_d = \frac{U_a}{R_a} + \left(\frac{U_a}{R_a + R_{load}} - \frac{U_a}{R_a} \right) \times e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1)$$

式(1)中, $\tau = \frac{L_1 + L_2 + L_s}{R_a}$ 。

故障电流达到换流开关动作阈值 I_s 所用的时间 t_1 则为

$$t_1 = \tau \times \ln \left[\frac{U_a \times R}{(U_a - I_s \times R_a) \times (R_a + R)} \right] \quad (2)$$

2.1.2 换流阶段

提前导通换流支路,同时关断载流支路IGBT。考虑到换流时间,设 t_2 时刻电流全部转移到换流支路。此时限流回路开始发挥作用,限流回路的动作过程分两个阶段,其电流路径见图3(b)、(c)。

受电阻 R 和电感 L 影响,故障电流先换流至 C 支路。随着电容的不断充电, C 支路电流 i_c 迅速减小。同时 RL 支路的 i_L 受到电阻 R 影响被限流,又因电感 L 影响增长缓慢。流过IGBT的电流 i_{com} 被成功限流。 t_3 时刻支路 C 电流 i_c 随着电容充电至饱和快速衰减为零,电流换流至 RL 支路,完成二次换流。令 $L_a = L_s + L_1 + L_2$,可得

$$\begin{cases} i_{com} = i_c + i_L = I_s + 0 = I_s \\ u_c = -L \frac{di_L}{dt} \\ i_c = -C \frac{du_c}{dt} \\ u_a = L_a \frac{di_{com}}{dt} + u_c \end{cases} \quad (3)$$

$t_2 \sim t_3$ 时刻电容支路电压、电流变化可表示为:

$$u_c = \frac{L u_a}{L_a + L} (\cos \beta t - 1) - \frac{I_s}{C \beta} \sin \beta t \quad (4)$$

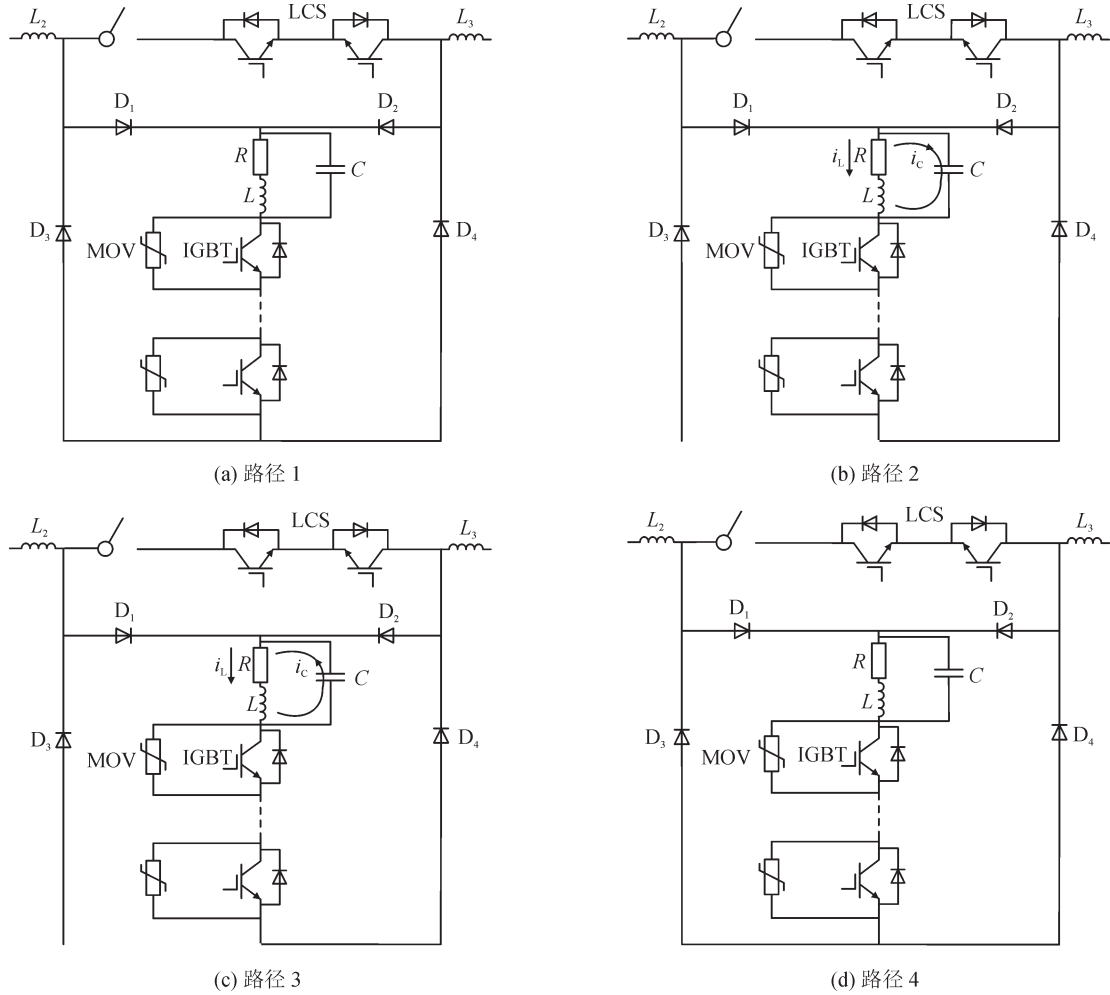


图3 开断过程等效电路图

Fig. 3 Schematic diagram of breaking process

$$i_c = I_s \cos \beta t + \frac{CI\beta u_a}{L_a + L} \sin \beta t \quad (5)$$

$$\text{式(4)、(5)中, } \beta = \sqrt{\frac{L_a - L}{L_a LC}}。$$

t_3 时刻当电容 C 充电完毕后,开始反向放电,电流通过 $C-L-R$ 回路,方向与 i_c 同向。流过 RL 支路的电流为两个电流的叠加。随着 i_c 的增大,电感 L 的限流效果增强, i_{com} 受到进一步的限流,直至 i_c 开始减小。

U_c 充电后,构成 RLC 串联电路,根据KVL

$$-u_c + u_R + u_L = 0 \quad (6)$$

由式(4)可得 $u_c(t_3) = U_c$,电感的初始电流为 I_{s1} 。则 t_3 时刻后电容电压可表示为

$$u_c = e^{-\frac{Rt}{2L}} \left(U_c \cos \omega t + \frac{2LI_{s1}}{CR\omega} \sin \omega t \right) \quad (7)$$

$$\text{式(7)中, } \omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}。$$

2.1.3 断路阶段

当通流支路电流全部换流到转移支路后,它的电流过零,快速机械开关动静触头开始无弧分断,

约在2 ms的时间内就能够开断至绝缘位。考虑到极控和阀控的命令下发传输延迟和故障检测上传延迟时间,转移支路的电流时间按照3 ms时间上升考虑,即 $t_2 \sim t_4$ 时间为3 ms。 t_4 时刻,IGBT在截止能力范围内被关闭。然后电流为IGBT的缓冲电容充电,当其电压超过MOV的阈值电压时,MOV导通,见图3(d)。值得注意的是,IGBT关断后,限流回路仍在做衰减振荡消耗其储存的能量。

2.1.4 耗能阶段

最后MOV导通,电流流过吸能支路。当MOV中的非故障侧电流快速衰减为零时,整个电流分断完成。设第3阶段结束时换流支路IGBT的开断电流为 I_{s3} 。

吸能支路电流为

$$i = I_{s3} e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{U_a - U_{MOV}}{R_a + R_s} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (8)$$

$$\text{式(8)中, } \tau = \frac{L_a + L_s}{R_a + R_s}。$$

2.2 参数设计

首先以张北500 kV高压直流输电系统为例进

行拓扑结构的参数设计,建立单端系统仿真模型。确定额定电压为500 kV,正常通流为3 kA。根据第一阶段公式进行短路初期电流优化,确定断路器两端电感 L_1 、 L_2 为75 mH,使电流在短路发生3 ms后才上升至12.8 kA。

2.2.1 电容充放电时间

在参数设计中,最重要的问题是要保证合适的电容充放电的时间周期。若电容充电时间过长, RL 限流电路的效果变差,甚至影响开断的时间;充放电时间也不宜短,应在电容放电结束前完成断路器的关断,避免二次充电。因为转移支路电流的持续时间按照3 ms考虑,也就是要电容的充电时间尽量短的同时确保电容完成一次充电和放电的时间不小于3 ms。

根据式(4)可知电容的充电时间主要受电感电容、系统电压 u_a 和阈值电流 I_s 的影响。在不同电感和电容条件下电压充电时间 t_a 见图4。

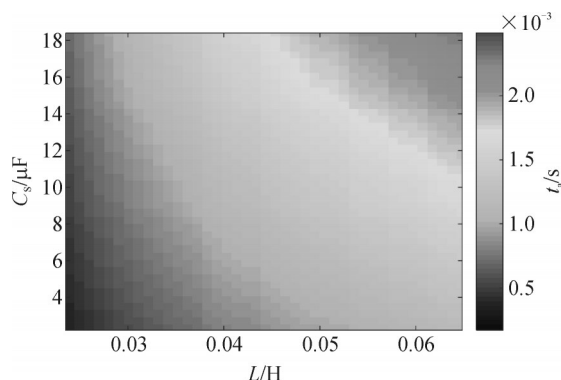


图4 不同电感和电容条件下的 t_a 值

Fig. 4 Values of t_a under different inductance and capacitance conditions

可以看到,两种参数的增加都会使电容的充电时间延长。对于参数的选择,需要尽量按照现有高压直流断路器的典型值选取,提高技术适用性。又根据式(7)计算得到电容放电时间 t_d 在不同电感和电容下的结果,再与相同条件的充电时间相加,得到总的充放电时间 t_c 见图5。继续得到 t_c 的各时段等值线,结合两个图像可以看出,最佳参数匹配曲线即为3 ms等值线。

2.2.2 限流能力

对短路故障动作过程分析可知,当流过电容的电流快速衰减至零时,电流全部转移至 RL 回路,电感 L 和电阻 R 完全发挥限流作用。由式(5)可知电感 L 取值越大,电流的上升速率越小,换流支路IGBT关断瞬间关断的电流也就越小,限流效果越明显。但是限流电感 L 的取值越大,相应的会使电容充放电时间变长,并且对直流系统的控制灵活性会有影响。

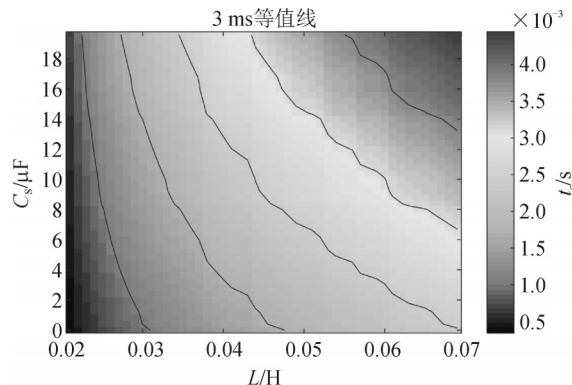


图5 不同电感和电容条件下的 t_c 等值线图

Fig. 5 Contour map of t_c under different inductance and capacitance conditions

不同参数对负载电流的影响结果见图6。根据图6中最佳参数曲线选择3组 L 偏大的参数进行验证,当电流切换到换流支路时,限流电感开始发挥作用,随着电流逐渐转移到 RL 支路,电流被电阻限流,同时电感限制电流的上升速率。可以看到,电容 C 越大,电容充能速度越慢,电感 L 越小, RL 支路限流效果也就变差。

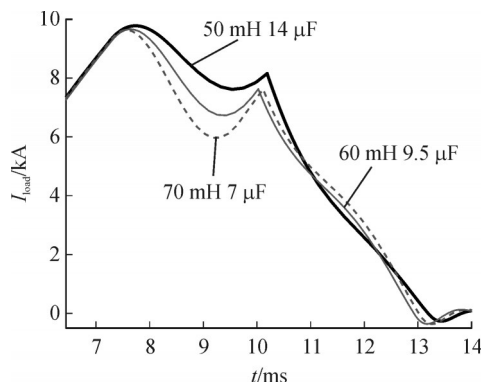


图6 几组最佳参数的 i_{load} 仿真结果

Fig. 6 Simulation results of i_{load} under several optimal parameters

限流电阻 R 可以增大限流回路阻尼,电路中阻值越大,限流电路的峰值电流就越小,对换流支路的固态开关硬件要求也就越低。同时通过限流电阻的耗能,减少断路过程中避雷器吸收的能量。但综合考虑到大功率电阻制造困难、对散热要求较高以及经济性问题等,本方案采用20 Ω 的限流电阻。根据仿真限流电阻 R 的最大瞬时功率为3 540 MW,平均功率为1 180 MW且持续时间仅为几ms。同时断路器关断后限流回路中的能量由电阻 R 耗散,约为1.29 MJ。

相较于不加限流回路 RLC 的典型混流直流断路器,二者开断时间基本一致。因为影响断路器开断时间的主要因素是第一次换流所需时间和快速机械开关开断时间,而加入 RLC 回路对两种因素影

响较小。 RLC 主要影响吸能支路吸收能量的时间,虽然限流效果有较大的提升,但会导致电路中存在大电感而延缓转移支路闭锁时电流换流到吸能支路的速度和氧化锌避雷器吸收能量所需要的时间。这种负面影响是可以抵消的,限流后IGBT关断电流减小,使吸能支路的峰值电流也随之减小,从而减小了电流降为零需要的时间。

3 仿真分析

在MTLAB/Simulink仿真软件中搭建模型对文中设计的限流式直流断路器进行仿真,简化电路见图7。当仿真试验开始时,通过关闭开关使负载电阻短路来模拟故障电流。直流断路器的参数见表1。

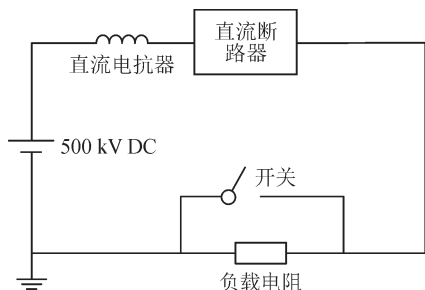


图7 仿真模型简化电路

Fig. 7 Simplified circuit of simulation model

表1 仿真模型相关参数

Table 1 Parameters related to simulation model

参数	数值
额定直流电压 U_d/kV	500
额定直流电流 I_d/kA	3
平波电抗器 $L_1, L_2/\text{mH}$	75
线路等效电阻 R_s/Ω	1.5
线路等效电感 L_s/mH	5
换流支路电容 $C/\mu\text{F}$	11
换流支路限流电阻 R/Ω	20
换流支路限流电感 L/mH	60
通流支路等效电感 $L_c/\mu\text{H}$	10
通流支路等效电感 $L_{c1}/\mu\text{H}$	10
负载电阻 R_{load}/Ω	166

正常运行时通流支路的电流为3 kA,设定断路器右侧在5 ms发生短路故障,经过2 ms后检测到短路故障并闭锁LCS,见图8。从图8可以看到电路从5 ms电流急剧上升,速率为2.7 kA/ms。2 ms后故障电流先流过 C 支路,随着电容的不断充电转移至 RL 支路,此过程中由于 RL 支路阻抗提高,电流初步受到限制。8.5 ms时刻电容充电完毕,开始反向放电, RL 支路电流快速上升,使得电感 L 的限流能力提

高,故障电流被进一步限制。9.5 ms时刻电容释放的电流开始减小, L 的限流效果减弱。故障电流在10 ms时刻被关断,约3 ms后断路器将电路中的能量耗散,电流归零,断路器成功分断。

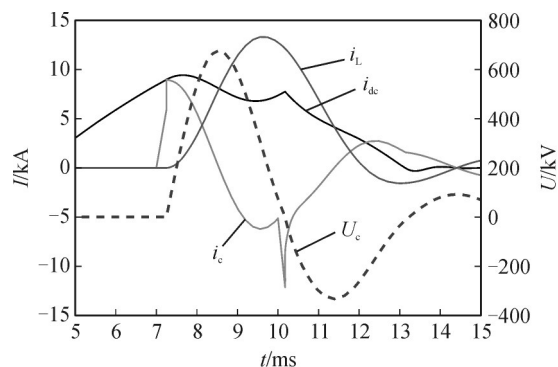


图8 直流断路器开断仿真波形图

Fig. 8 The simulated breaking waveforms of the HVDC circuit breaker

为了更好地说明 $C-L-R$ 回路的限流效果,设立了一组新的限流回路进行比较,其结构见图9。与原电路不同,当电容充电结束后,受二极管阻碍电容只能通过 R_c 放电。由此可以较好地说明二阶段电容放电对故障电流的限流的影响。对两种拓扑结构的断路器分别进行仿真验证并比较,结果见图10。

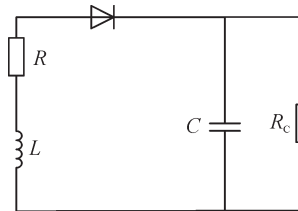


图9 新方案限流电路拓扑

Fig. 9 Current limiting circuit topology of the new scheme

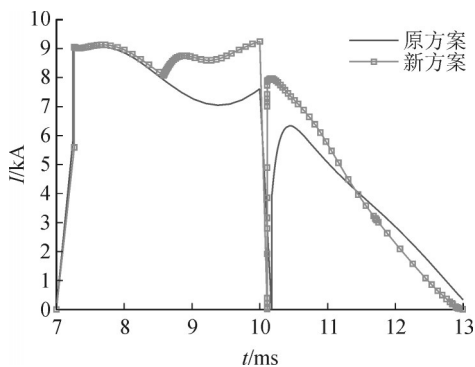


图10 两种方案电流波形图

Fig. 10 Current waveform of two schemes

从图10中可以看到在8.5 ms时刻,新方案的电流开始逐渐增加,相较于新方案的拓扑原方案能进一步继续限流,电流降低了17%。采用原方案的限流断路器可以明显减少避雷器所吸收的能量,二次限流后避雷器吸收的能量为原来的80%,这大大减

轻了避雷器的压力。但是,由于原方案中电感的限流效果更强,吸能电路存在因电感大而引起的能量释放慢的问题。

4 结论

文中着重对高压直流断路器的限流能力进行研究分析,设计了一种新型限流式直流断路器拓扑,详细展示了该断路器的限流过程并对参数进行比较分析,最后搭建仿真模型进行了试验验证,得到以下结论:

1)文中在限流支路采用电容进行二次换流,利用 RL 支路的高阻感性,使故障电流的峰值和上升速率大大降低。

2)电容反向放电至 RL 支路可以进一步提高电感限制电流增大的效果,使故障电流得到进一步的抑制,关断电流降低了17%。但文中未能精确地对这种限流效果进行描述,期待下一步工作做出完善。

3)本方案中避雷器吸收的能量大幅度减小,故障电流受到限制后吸能支路的吸能压力也显著降低。同时因电流小,一定程度上弥补了大电感造成的能量释放慢的问题。

参考文献:

- [1] 张悻宁,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.
- [2] 孙珂珂,钟建英,谭盛武,等.限流开断技术用直流快速旁路开关设计与研究[J]. 广东电力,2021,34(1):136-142.
SUN Keke, ZHONG Jianying, TAN Shengwu, et al. Design and research of DC fast bypass switch for current limiting and breaking technology[J]. Guangdong Electric Power, 2021, 34(1):136-142.
- [3] 贺之渊,王威儒,谷怀广,等.故障限流及开断功能的直流电网集成化关键设备发展现状及展望[J]. 中国电机工程学报,2020,40(11):3402-3418.
HE Zhiyuan, WANG Weirui, GU Huaiguang et al. Development status and prospect of integrated key equipment of DC power grid with fault current limiting and breaking functions [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11):3402-3418.
- [4] LI B, HE J, LI Y, et al. A novel current commutation-based FCL for the flexible DC grid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(1):591-606.
- [5] ZOU G, FENG Q, HUANG Q, et al. A fast protection scheme for VSC based multi-terminal DC grid[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018(98):307-314.
- [6] ZHENG Xiangyu, JIA Rong, GONG Linling, et al. An optimized coordination strategy between line main protection and hybrid DC breakers for VSC-based DC grids using overhead transmission lines[J]. Energies, 2019, 12(8):1-13.
- [7] 于海.一种强制换流型混合直流断路器方案[J]. 高压电器,2018,54(4):205-210.
YU Hai. Scheme of hybrid DC circuit breaker based on forced current commutation principle[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(4):205-210.
- [8] 张增强,解超,陈伟伟,等.基于电容调压原理的自适应高压直流断路器[J]. 高压电器,2021,57(9):152-160.
ZHANG Zengqiang, XIE Chao, CHEN Weiwei, et al. Adaptive HVDC circuit breaker based on capacitor voltage regulation principle[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(9):152-160.
- [9] KESHAVARZI D, FARJAH E, GHANBARI T. A hybrid DC circuit breaker and fault current limiter with optional interruption capability[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 33(3):2330-2338.
- [10] LI Botong, CUI Hanqing, JING Fangjie, et al. Current-limiting characteristics of saturated iron-core fault current limiters in VSC-HVDC systems based on electromagnetic energy conversion mechanism[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(2):412-421.
- [11] FENG Lei, GOU Ruifeng, ZHUO Fang, et al. Research on the breaking branch for a hybrid DC circuit breaker in ± 500 kV voltage-sourced converter high-voltage direct current grid[J]. IET Power Electronics, 2020, 13(16):3560-3570.
- [12] 郭贤珊,周杨,梅念,等.张北柔直电网的构建与特性分析[J]. 电网技术,2018,42(11):3698-3707.
GUO Xianshan, ZHOU Yang, MEI Nian, et al. Construction and characteristic analysis of zhangbei flexible DC grid [J]. Power System Technology, 2018, 42(11):3698-3707.
- [13] 王振浩,佟林,李赫,等.66 kV中压配电网中性点位移电压产生机理及有源抑制方法[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(4):11-21.
WANG Zhenhao, TONG Lin, LI He, et al. 66 kV medium voltage distribution network neutral displacement voltage generating mechanism and active suppression method[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4):11-21.
- [14] 曹莹,顾翔.一种适用于智能配电网的DC/DC换流器拓扑及其控制策略[J]. 电网与清洁能源,2021,37(12):25-32.
CAO Ying, GU Xiang. A DC/DC converter topology and its control strategy for smart distribution networks[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(12):25-32.

- [15] MOKHBERDORAN A, CARVALHO A, SILVA N, et al. Application study of superconducting fault current li-miters in meshed HVDC grids protected by fast pro-tecton relays [J]. Electric Power Systems Research, 2017(143):292-302.
- [16] 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.
- [17] LI Wei, WU Xueguang, LIU Dong, et al. Fast fault detection and current limiting strategy of HVDC circuit breaker [J]. Iop Conference, 2018(394): 1-6.
- [18] CHO K C, PARK M K, LIM S H. Analysis of the DC fault current limiting characteristics of a DC superconducting fault current limiter using a transformer[J]. Energies, 2020, 13(16):399072.
- [19] AMOR Y A, DIDIER G, HAMOUDI F, et al. Application of a novel approach of resistive type superconducting fault current limiter with a fast protection system in multi terminal direct current network[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2020, 30(10): 12568.
- [20] 金 晶, 殷 勤. 含电阻型超导限流器的南澳柔性直流系统故障特性分析[J]. 高压电器, 2020, 56(12):286-291.
- JIN Jing, YIN Qin. Fault characteristics analysis of nan'ao flexible DC system with resistance superconducting current limiter[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(12):286-291.
- [21] 葛雪峰, 张 亮, 李丹栋, 等. 交直流混合配电网直流故障限流器拓扑及工作原理综述[J]. 广东电力, 2020, 33(12):102-108.
- GE Xuefeng, ZHANG Liang, LI Dandong, et al. Review on topology and working principle of DC fault current limiter for AC - DC hybrid distribution network[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 33(12): 102-108.
- [22] 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.
- [23] 熊郁芬, 秦飞翔, 黄智鹏, 等. 基于馈线树动态拓扑的高容错故障定段方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(14): 159-164.
- XIONG Yufen, QIN Feixiang, HUANG Zhipeng, et al. High fault-tolerant fault segmentation method based on feeder tree dynamic topology[J]. Power System Protection and Contro, 2020, 48(14):159-164.
- [24] PARK S Y, CHOI H S. Operation characteristics for the superconducting arc-induction type DC circuit breaker[J]. Energies, 2020, 13(15): 1-13.
- [25] 王振浩, 张力斌, 成 龙, 等. 一种具备限流功能的混合式高压直流断路器[J]. 电网技术, 2021, 45(5): 2042-2049.
- WANG Zhenhao, ZHANG Libin, CHENG Long, et al. Hybrid high voltage DC circuit breaker with current limiting function[J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 2042-2049.
- [26] LI Shuai, ZHAO Chengyong, XU Jianzhong, et al. A new topology for current limiting HVDC circuit breaker[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019(104):933-942.
- [27] 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 HVDC circuit breaker topology with current limiting capacity[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(10): 143-149.
- [28] 罗永志, 党 伟, 刘宏扬, 等. 考虑雷电过电压的风电机组拓扑结构优化[J]. 电瓷避雷器, 2021(5):54-60.
- LUO Yongzhi, DANG Wei, LIU Hongyang, et al. Topology optimization of wind turbines considering lightning overvoltage[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(5):54-60.

熊 迪(1997—), 男, 硕士, 主要从事电力电子技术在电力系统中的应用研究(E-mail:820749751@qq.com)。

谭亲跃(1975—), 男, 博士, 副教授, 主要从事软开关技术、电能质量、新能源发电等方面的研究(通信作者)(E-mail:qinyuetan@126.com)。