

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210688

# 一种基于饱和铁心型超导限流器的混合直流限流电路的研究

路佳宁, 信 赢, 王常骐, 杨 超, 杨天慧

(天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072)

**摘要:** 基于电压源型换流器的高压直流输电系统的故障电流幅值大、上升速度快, 现有直流断路器的故障电流开断容量和开断速度受到很大挑战。提出一种基于饱和铁心型超导限流器的混合直流限流电路, 利用饱和铁心型超导限流器及限流电阻共同作用实现阻感复合限流, 并借助吸能电阻达到加速故障电流清除、缓解直流断路器开断压力的目的。根据直流故障暂态特性, 结合该混合直流限流电路与混合式直流断路器的配合策略, 分阶段对该混合直流限流电路的工作原理进行理论解析。通过数学推导给出所提混合直流限流电路的参数设计原则。最后, 在PSCAD/EMTDC仿真平台中对所提混合直流限流电路的原理正确性和功能有效性进行验证。结果表明, 所提混合直流限流电路能有效抑制故障电流、缩短故障线路隔离时间、减少避雷器吸能并能实现饱和铁心型超导限流器快速恢复。

**关键词:** 直流故障; 混合直流限流电路; 饱和铁心型超导限流器; 直流断路器; 阻感限流效果

## Research on an SI-SFCL-based hybrid DC current-limiting circuit

LU Jianing, XIN Ying, WANG Changqi, YANG Chao, YANG Tianhui

(School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The fault current of a voltage source converter-based high voltage direct current (VSC-HVDC) system has the characteristics of high amplitude and fast-rising speed. Therefore, the available hybrid DC circuit breaker (HDCCB) faces great challenges in breaking capacity and breaking speed. A saturated iron-core superconducting fault current limiter-based hybrid DC current-limiting circuit (SI-SFCL-HDCCLC) is proposed. This uses the saturated iron-core superconducting current limiter and current-limiting resistor to realize the resistive-inductive compound current-limiting. It also uses an energy absorbing resistor to accelerate the fault current clearing and relieve the breaking pressure of the HDCCB. This paper introduces the working principle of the SI-SFCL-HDCCLC theoretically in stages in combination with the coordination strategy of the proposed SI-SFCL-HDCCLC and hybrid HDCCB (HDCCB) based on the transient characteristics of a DC fault. Then the principles of the parameter design of the SI-SFCL-HDCCLC are analyzed with mathematical derivation. Finally, the theoretical correctness and functional effectiveness of the proposed SI-SFCL-HDCCLC are validated in a PSCAD/EMTDC based environment. The simulation results indicate that the proposed SI-SFCL-HDCCLC combined with HDCCB can effectively suppress fault current, shorten the isolation time of the fault line, reduce the energy absorption of the arrester and realize the rapid recovery of the SI-SFCL.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52107023).

**Key words:** DC fault; hybrid DC current-limiting circuit; saturated iron-core superconductive fault current limiter; DC circuit breaker; effect of resistive-inductive compound current-limiting

## 0 引言

基于电压源型换流器的高压直流输电系统 (Voltage Source Converter based High Voltage Direct

Current, VSC-HVDC) 由于具有控制方式灵活、可以实现有功功率控制和无功功率控制解耦等优势<sup>[1-5]</sup>, 得到广泛关注。

然而, VSC-HVDC 在系统发生直流侧短路故障时, 直流故障电流在几毫秒内快速上升达到额定电流的几倍甚至几十倍<sup>[6-7]</sup>。而现有的混合直流断路器

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52107023)

(Hybrid DC Circuit Breaker, HDCCB)难以在如此短的时间内开断如此大的故障电流<sup>[8]</sup>。因此,开发能够限制故障电流的直流限流装置,与现有的HDCCB配合完成对VSC-HVDC系统的保护是十分必要的。

目前的直流故障限流装置根据限流方式主要分为:电阻型限流器<sup>[9-11]</sup>、电感型限流器<sup>[12-14]</sup>和混合型限流器<sup>[15-17]</sup>。电阻型限流器能通过增大故障回路等效电阻来改善系统的阻尼特性、减小故障电流幅值。现有的电阻型超导限流器利用超导材料的失超电阻实现对故障电流的抑制作用,具有结构紧凑、原理简单、制造工艺较为成熟的特点,在全球范围内已形成多处工程应用示范。相比于电阻型限流器,电感型限流器在抑制故障电流上升率方面更具有优势,能更好地与HDCCB配合清除系统故障<sup>[18]</sup>。前人在研究电感型故障限流器的实现方面作了大量工作<sup>[19-22]</sup>,但对于配置HDCCB的直流系统来说,借助大电感限流,会延长故障线路的隔离时间,且电感储存的能量可能会导致HDCCB中避雷器因热过载而损坏。

为了减少大电感接入线路带来的负面影响,文献[23]提出由限流电感及并联吸能支路(由电阻和晶闸管构成)组成的混合限流电路,该方法减少避雷器吸能和加速故障电流衰减的效果明显,但限流电感始终串联在直流线路中,系统稳定及控制响应速度受串联电感值的影响较大;文献[24]提出在断路时限流电感快速旁路的方法,有效降低了避雷器的耗能;文献[25]提出了一种快速响应直流限流器拓扑,该拓扑在永磁饱和型限流器基础上,通过磁耦合引入辅助支路,避免了大电感长期投入的问题,但永磁体退磁的问题客观存在。

饱和铁心型超导限流器(Saturated Iron-Core Superconducting Fault Current Limiter, SI-SFCL)具有在系统正常时低阻抗不影响系统运行,在系统故障时高阻抗进行限流的重要特点<sup>[26-27]</sup>,能够实现电力系统中理想的限流性能。已有部分文献针对SI-SFCL在柔性直流系统中的应用进行了研究<sup>[28-29]</sup>。然而SI-SFCL作为电感型限流器,只能限制故障电流的上升速度,无法有效减小直流故障电流的稳态值,且限流电感量越大,SI-SFCL的恢复时间将会越长。

综合以上问题,本文提出了一种基于饱和铁心型超导限流器的混合直流限流电路(以下简称“限流电路”),通过阻感复合限流抑制故障电流,配合直流断路器加速故障线路隔离并减少避雷器吸能。首先,介绍该限流电路的基本结构和工作原理。接着,

给出限流电路参数设计的原则。最后,在PSCAD/EMTDC中搭建仿真模型,研究该限流电路的有效性及其不同电路参数对其作用效果的影响。

## 1 基于饱和铁心型超导限流器的混合直流限流电路拓扑结构

限流电路拓扑结构图如图1所示。该限流电路由限流SI-SFCL单元、限流 $R_1$ 单元、吸能 $R_2$ 单元三部分组成。

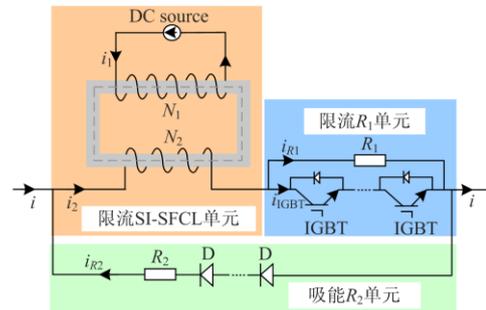


图1 基于饱和铁心型超导限流器的混合直流限流电路拓扑结构图

Fig. 1 Topology structure of saturated iron-core superconductive fault current limiter based hybrid DC current-limiting circuit

(1) 限流SI-SFCL单元为饱和铁心型超导限流器,结构如图2(a)所示。其主要由矩形闭合铁心、铜绕组、超导绕组及直流电源(DC Source)组成。 $N_1$ 、 $i_1$ 代表超导绕组的匝数、电流, $N_2$ 、 $i_2$ 代表铜绕组的匝数、电流。图2(b)为铁心的简化 $B-H$ 曲线。铁心饱和磁感应强度记为 $B_k$ ,对应的磁场强度记为 $H_k$ 。

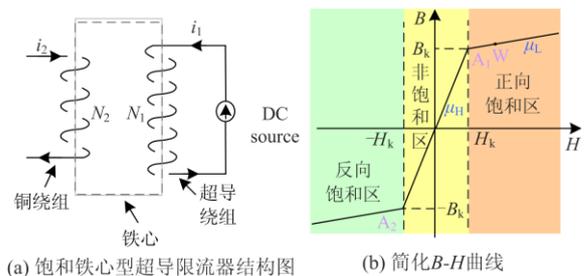


图2 饱和铁心型超导限流器结构图及简化 $B-H$ 曲线  
Fig. 2 Structure of saturated iron-core superconductive fault current limiter and simplified  $B-H$  curve

系统正常运行时,SI-SFCL的铜绕组与直流电网直接相连,直流电源为超导绕组提供偏置电流,使得铁心处于深度饱和状态,即SI-SFCL工作在W点,铁心磁导率很小,记为 $\mu_L$ ,此时SI-SFCL的电感很小,记为 $L_L$ ;当系统发生故障时,铜绕组中故

障电流迅速增大, 迫使铁心退饱和, SI-SFCL 工作点迅速由 W 转移至  $A_1$ , 此后故障电流继续增大, SI-SFCL 进入非饱和区, 此时的铁心磁导率很大, 记为  $\mu_H$ , SI-SFCL 呈现大电感  $L_H$ , 限制故障电流上升率。

(2) 限流  $R_1$  单元由限流电阻  $R_1$  及与  $R_1$  并联的 IGBT 组构成。系统正常运行时, IGBT 导通,  $R_1$  被旁路并不接入直流回路中; 当系统发生故障时, IGBT 关断,  $R_1$  接入直流故障回路, 起到辅助限流的效果。

(3) 吸能  $R_2$  单元由吸能电阻  $R_2$  及二极管组 D 串联构成。由于二极管的单向导通特性, 根据拓扑其正常运行中不会导通, 只有当吸能单元承受反向电压时才会投入电路。

## 2 限流电路工作原理

通过对该限流电路与混合直流断路器进行时序配合清除短路故障的全过程进行分析, 详细介绍该限流电路的工作原理。

### 2.1 混合直流断路器

典型的混合直流断路器(HDCCB)拓扑结构<sup>[30]</sup>如图3所示。HDCCB由通流支路(LCB)、电流转移支路(MCB)和耗能支路(EDB)三部分并联组成。系统正常运行时负荷电流流经 LCB, 通态损耗较小。当系统发生直流故障后, 电流转移开关(LCS)接收到故障信号后关断, 故障电流换流至提前导通的 MCB 中; 当 LCB 中的电流减小到零时, 快速机械开关(FMS)打开, 实现了无弧分断, 此时关断 MCB; EDB 中避雷器(MOV)由于承受过电压而动作, 吸收故障电流, 直到故障电流减小至隔离开关(RCB)能承受的关断容量后, RCB 打开, 直流断路器完成对故障线路的隔离。

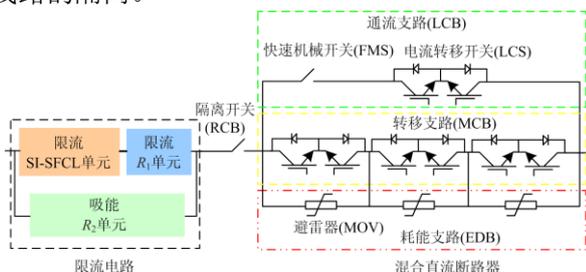


图3 混合直流断路器拓扑结构图

Fig. 3 Topology of hybrid DC circuit breaker

### 2.2 限流电路工作原理分析

VSC-HVDC 系统直流侧故障中两极短路故障最为严重, 故本文对两极短路故障进行分析。两极短路故障一般分为三个阶段: 电容放电阶段、二极

管全导通阶段和不控整流阶段。一般要求在电容电压跌落至零前完成对直流故障的隔离, 因此本文只考虑电容放电阶段, 且忽略交流侧电网的影响<sup>[31]</sup>。

限流电路与混合直流断路器的配合时序如图4所示。

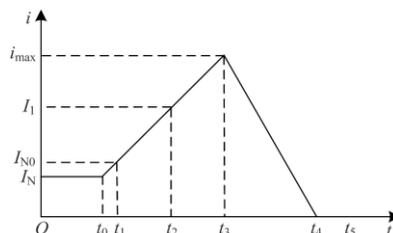


图4 限流电路与混合直流断路器的配合时序图

Fig. 4 Coordination between proposed current-limiting and HDCCB

其具体流程如下所述。

(1) 正常运行阶段(0— $t_0$ ): 系统正常运行, 额定电流为  $I_N$ , 该电流不足以使 SI-SFCL 的铁心退饱和, SI-SFCL 呈现小电感  $L_L$ 。此时负荷电流流经处于导通状态的 IGBT 组,  $R_1$  被旁路。同时, 二极管组 D 由于承受反向电压关断, 吸能单元  $R_2$  不会接入电路。这一阶段, HDCCB 的 LCB 为负荷电流提供通路。

(2) 故障初期( $t_0$ — $t_1$ ):  $t = t_0$  时, 假设系统在某处发生故障, 故障电流快速上升, 随着故障电流的增大, SI-SFCL 铁心开始退饱和。假设铜绕组电流  $i = I_{N0}$  时, SI-SFCL 工作于 B-H 曲线的  $A_1$  点。在  $t_0$ — $t_1$  期间, 由于  $i < I_{N0}$ , 铁心不能完全退饱和, SI-SFCL 的电感值依旧很小为  $L_L$ 。此阶段持续时间很短, 为简化分析忽略这一过程, 并设  $I_{N0} = i(t_1) = i(t_0) = I_N$ ,  $U_{N0} = u(t_1) = u(t_0) = U_0$ 。

(3) SI-SFCL 单独限流阶段( $t_1$ — $t_2$ ):  $t = t_1$  时,  $i > I_{N0}$ , 铁心退出饱和区, 进入非饱和区, SI-SFCL 迅速产生大电感  $L_H$ , 限制故障电流  $i$  的上升速率。由于故障检测时间的延时作用, HDCCB 尚未动作。此时, 该阶段的故障原理图如图5所示。

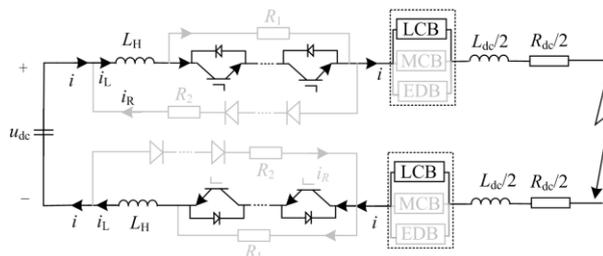


图5 SI-SFCL 单独限流阶段原理图

Fig. 5 Schematic diagram of SI-SFCL separate current-limiting stage

记  $R_a = R_{dc}$ ,  $L_1 = 2L_H + L_{dc}$ 。一般情况下,  $R_a < 2\sqrt{L_1/C}$ , 电路处于欠阻尼状态。直流电压  $u_{dc}$  和故障电流  $i$  的暂态响应解为

$$u_{dc}(t) = e^{-\sigma(t-t_0)} \left[ \frac{U_0 \omega_0}{\omega} \sin(\omega t + \beta) - \frac{I_N}{\omega C} \sin \omega t \right] \quad (1)$$

$$i(t) = e^{-\sigma(t-t_0)} \left[ \frac{U_0}{\omega L_1} \sin \omega t - \frac{I_N \omega_0}{\omega} \sin(\omega t - \beta) \right] \quad (2)$$

式中:  $U_0 = U(t_0)$ 、 $I_N = I(t_0)$  分别为系统正常运行情况下的直流电压、电流;  $\sigma = R_a / (2L_1)$ ;  $\beta = \arctan(\omega / \sigma)$ ;  $\omega = \sqrt{1/(LC) - [R_a / (2L_1)]}$ ;  $\omega_0 = \sqrt{\sigma^2 + \omega^2}$ 。

所以, 在  $t = t_2$  时, 系统直流电压  $U_1 = u(t_2)$ 、电流  $I_1 = i(t_2)$ 。

(4) 混合限流阶段( $t_2 - t_3$ ):  $t = t_2$  时刻 HDCCB 接收到故障信号开始动作, LCS 断开, 故障电流逐渐换流至提前导通的 MCB; 对于限流电路来说, 限流  $R_1$  单元中 IGBT 组也接收到信号断开, 限流电阻  $R_1$  投入限流。此阶段直流故障原理图如图 6 所示。

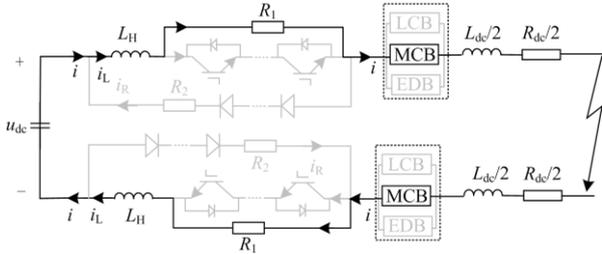


图 6 混合限流阶段原理图

Fig. 6 Schematic diagram of mixed current-limiting stage

电阻  $R_1$  接入线路后, 记  $R_b = 2R_1 + R_{dc}$ , 且  $R_b > 2\sqrt{L_1/C}$ , 故障回路由欠阻尼变为过阻尼。此时对应  $u_{dc}$ 、 $i$  的解为

$$u_{dc}(t) = A_1 e^{\delta_1(t-t_2)} + A_2 e^{\delta_2(t-t_2)} \quad (3)$$

$$i(t) = -2C(A_1 \delta_1 e^{\delta_1(t-t_2)} + A_2 \delta_2 e^{\delta_2(t-t_2)}) \quad (4)$$

其中:  $\delta_{1,2} = -\frac{R_b}{2L_1} \pm \sqrt{\left(\frac{R_b}{2L_1}\right)^2 - \frac{1}{L_1 C}}$ ;

$$A_1 = \frac{I_1 / C + \delta_1 U_1}{\delta_2 - \delta_1}; \quad A_2 = \frac{I_1 / C + \delta_2 U_1}{\delta_1 - \delta_2}.$$

可求得峰值电流  $i_{\max} = i(t_3)$  及此时对应的电压  $U_{\min} = u(t_3)$ 。

(5) 线路故障电流清除阶段( $t_3 - t_4$ ):  $t = t_3$  时刻, MCB 关断, MOV 投入, 故障电流开始衰减。此时 SI-SFCL 两端感应出反向电压  $-L_H di_L / dt$ , 使二极管组 D 由于承受正向电压导通, 进而使得  $R_2$  接入故

障回路。此阶段直流原理图如图 7 所示。

为简化分析, 忽略此阶段直流侧电压变化, 用恒定直流源  $U_{\min}$  代替电容电压<sup>[22]</sup>, 并且忽略线路参数的影响。因此, 该电路的 KVL 方程为可用式(5)表示。

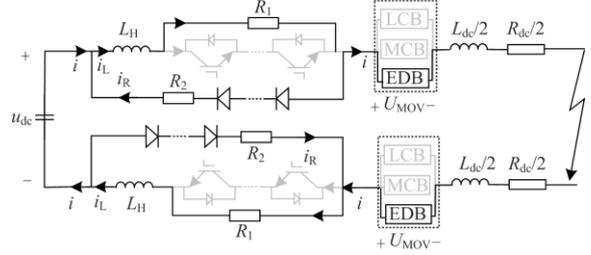


图 7 线路电流清除阶段原理图

Fig. 7 Schematic diagram of line current clearance stage

$$\begin{cases} U_{\min} = 2(L_H \frac{di_L}{dt} + R_1 i_L + U_{MOV}) \\ i_L = i + i_R \\ L_H \frac{di_L}{dt} + R_1 i_L + R_2 i_R = 0 \end{cases} \quad (5)$$

由此可求得线路电流  $i$  衰减到零的时间  $t_c$  (即  $t_4 - t_3$ ):

$$t_c = \tau \ln \frac{i_{\max} - \frac{U_{\min} - 2U_{MOV}}{2R_1}}{\frac{2U_{MOV} - U_{\min}}{2} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)} \quad (6)$$

式中,  $\tau = L_H / R_1$ 。

显然, 吸能电阻  $R_2$  的加入减少了线路故障电流衰减时间, 并且  $R_2$  越小, 线路电流衰减时间  $t_c$  越短。

当线路故障电流降至 RCB 可以承受的开断值, RCB 打开, 隔离故障线路。但此时 SI-SFCL 中仍存在剩余电流, 记为  $I_0$ 。因此, 线路故障电流清除阶段系统中总能量变化  $E$  为

$$E = 2 \times \frac{1}{2} L_H (i_{\max}^2 - I_0^2) + \int_{t_3}^{t_4} u_{dc} i dt \quad (7)$$

则 MOV 吸收的能量  $E_{MOV}$  为

$$E_{MOV} = (E - E_1 - E_2) / 2 \quad (8)$$

式中:  $E_1$  表示限流电阻  $R_1$  吸收的能量;  $E_2$  表示吸能电阻  $R_2$  吸收的能量, 可由式(9)求得

$$\begin{aligned} E_1 &= 2 \times \int_{t_3}^{t_4} i_L^2 R_1 dt \\ E_2 &= 2 \times \int_{t_3}^{t_4} ((L_H \frac{di_L}{dt} + R_1 i_L) / R_2)^2 R_2 dt = \\ &2 \times \int_{t_3}^{t_4} (L_H \frac{di_L}{dt} + R_1 i_L)^2 / R_2 dt \end{aligned} \quad (9)$$

可以看出, 吸能电阻  $R_2$  及限流电阻  $R_1$  能有效

降低 MOV 的吸能, 缓解 MOV 的吸能压力。

(6) SI-SFCL 恢复阶段( $t_4-t_5$ ): 故障线路隔离后, SI-SFCL 中存在的剩余电流  $I_0$  经  $L_H$ 、 $R_1$ 、 $R_2$  形成独立回路消耗。此阶段原理图如图 8 所示, 相应的电路方程为

$$L_H \frac{di_L}{dt} + (R_1 + R_2)i_L = 0 \quad (10)$$

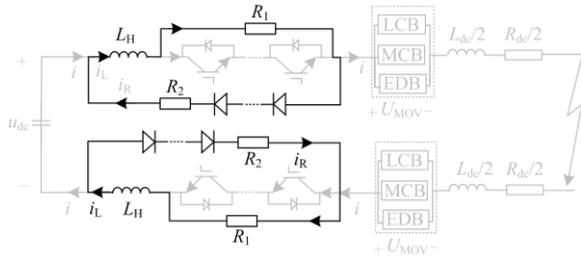


图 8 SI-SFCL 恢复阶段原理图

Fig. 8 Schematic diagram of SI-SFCL recovery stage

当电流下降至  $i_L = I_{N0}$  时, 铁心进入饱和区, SI-SFCL 呈现小电感  $L_L$ , 直至电流衰减到残余电流  $I_{can}$ , 故障彻底清除。此时电路方程变为

$$L_L \frac{di_L}{dt} + (R_1 + R_2)i_L = 0 \quad (11)$$

因此, 独立回路电流  $i_L$  由  $I_0$  衰减到  $I_{can}$  的时间  $t_L$  为

$$t_L = \frac{L_H}{R_1 + R_2} (\ln I_0 - \ln I_{N0}) + \frac{L_L}{R_1 + R_2} (\ln I_{N0} - \ln I_{can}) \quad (12)$$

可以看出, 电阻  $R_2$  越大, 衰减时间  $t_L$  越小, 表明回路电流  $i_L$  衰减越快, SI-SFCL 恢复越迅速。

### 3 限流电路参数设计原则

本节在上述限流电路拓扑及工作原理的基础上给出该限流电路参数的设计原则。

#### 3.1 饱和铁心型超导限流器的设计

对于 SI-SFCL 参数的设计, 需满足以下几点。

(1) 由于 SI-SFCL 为非失超型超导限流器, 所以 SI-SFCL 中流过超导绕组的电流必须始终保持小于超导绕组的临界电流  $I_c$ , 一般取  $i_1 < \alpha I_c$ , 式中  $\alpha < 1$  为安全系数。

(2) SI-SFCL 在系统正常运行时, 应保证铁心处于深度饱和状态, 则根据安培环路定理有:

$$\frac{N_1 i_1 - N_2 I_N}{l} > H_k \quad (13)$$

式中,  $l$  表示磁路长度。

(3) SI-SFCL 在系统发生故障时, 铁心迅速退饱和, 使得 SI-SFCL 呈现大电感特性, 限制故障电流

的上升速度。此时 SI-SFCL 相当于一个限流电感  $L$ , 在直流系统故障时, 限流电感值  $L$  应当满足:  $\max(di/dt) = U_0/L$  [32], 那么:

$$L_H > \frac{U_0}{di/dt} \quad (14)$$

并且 SI-SFCL 的电感值可以采用式(15)计算[26]:

$$L = \frac{N_2^2 S}{l} \left( \mu - \frac{N_1 i_1 - N_2 i_2}{N_2} \frac{d\mu}{di_2} \right) \quad (15)$$

式中,  $S$  表示铁心截面积。

(4) 除此之外, 还应当保证 SI-SFCL 在整个限流过程中始终具有强限流能力, 即在限流过程中铁心不会进入反向饱和区。

考虑最严重的故障情况, 系统在换流站出口发生两极短路, 此时可完全忽略线路参数的影响。因此, 在故障过程中, 电流  $i$  由正常运行时的电流  $I_N$  上升至最大故障电流  $i_{max}$  的过程中, SI-SFCL 储存的总能量  $\Delta W_1$  可表示为

$$\Delta W_1 = \frac{1}{2} L_H i_{max}^2 - \frac{1}{2} L_L I_N^2 \quad (16)$$

而满足故障过程中铁心不会进入反向饱和区的 SI-SFCL 最大储能  $\Delta W_{L,max}$  为[33]

$$\Delta W_{L,max} = 2SN_1 i_1 B_k \quad (17)$$

因此, 为保证故障过程中铁心不进入反向饱和区, 需满足:

$$2SN_1 i_1 B_k \geq \frac{1}{2} L_H i_{max}^2 - \frac{1}{2} L_L I_N^2 \quad (18)$$

#### 3.2 IGBT 的设计

设计 IGBT 最重要的参数就是其耐压上限  $U_{max}$  及额定电流  $I_{rated}$ 。当 IGBT 开断后, 其应能承受由  $R_1$  导致的压降, 即 IGBT 组的耐压值应高于其两端过电压, 如式(19)。

$$k_1 M U_{max} \geq U_{IGBT} \quad (19)$$

式中:  $U_{IGBT}$  为故障期间 IGBT 组最大过电压;  $k_1$  为耐压可靠系数, 通常取 0.9~0.95;  $M$  表示串联 IGBT 个数;  $U_{max}$  为单个 IGBT 的耐压上限。

根据限流电路工作原理部分分析可知, 流经 IGBT 的最大电流为  $i(t_2) = I_1$ , 则 IGBT 的额定电流  $I_{rated} \geq (t_2) = I_1$ 。

#### 3.3 限流电阻 $R_1$ 的设计

理论上,  $R_1$  越大, 限流效果越明显, SI-SFCL 恢复越迅速, 但是  $R_1$  越大, 故障期间 IGBT 组承受的电压  $U_{IGBT}$  就越大, 有可能导致 IGBT 由于承受过电压而被击穿, 因此  $R_1$  取值不宜太大。 $R_1$  导致的压降应当在 IGBT 的耐压范围内, 即  $R_1 i_{max} \leq k_1 M U_{max}$ 。同时需要满足在  $R_1$  接入故障回路后, 回路由欠阻尼

状态转变成过阻尼状态, 即  $R_b > 2\sqrt{L_1/C}$ 。

因此,  $R_1$  的取值需满足:

$$2\sqrt{\frac{L_H + L_{dc}}{C}} - R_{dc} < R_1 \leq \frac{k_1 M U_{max}}{i_{max}} \quad (20)$$

### 3.4 二极管的设计

在故障限流阶段, 二极管组 D 应当能承受系统故障时 SI-SFCL 和  $R_1$  两端的过电压, 即

$$U_D \geq k_2 \frac{L_H \frac{di_2}{dt} + R_1 i_{R_1}}{N} \quad (21)$$

式中:  $U_D$  为单个二极管的最高反向工作电压;  $k_2$  为耐压可靠系数, 一般取 0.9~0.95;  $N$  表示串联二极管个数。

### 3.5 吸能电阻 $R_2$ 的设计

由原理分析部分可知, 系统在隔离故障线路后, SI-SFCL 中剩余电磁能经独立回路中的  $R_1$ 、 $R_2$  消耗, 这个过程需要一定的时间  $t_L$ 。考虑到系统重合闸, SI-SFCL 的恢复时间应不超过系统重合闸时间  $t_{reclosing}$ , 即  $t_L \leq t_{reclosing}$ 。故  $R_2$  应满足:

$$R_2 \geq \left( \frac{L_H}{t_{reclosing}} (\ln I_0 - \ln I_{N0}) + \frac{L_L}{t_{reclosing}} (\ln I_{N0} - \ln I_{can}) \right) - R_1 \quad (22)$$

## 4 仿真验证

在 PSCAD/EMTDC 中搭建  $\pm 200$  kV 的两端 VSC-HVDC 系统, 如图 9 所示, 系统运行参数见表 1。假设  $t=1$  s 时, 系统换流站 1 出口 5 km 处发生两极短路故障。考虑故障检测时间为 2 ms, 根据现有的 IGBT 技术, 其关断时间可达到微秒级别, 因此认为 IGBT 瞬间关断, 从而设定限流电阻  $R_1$  在

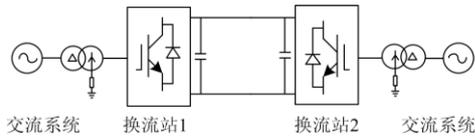


图 9 VSC-HVDC 系统

Fig. 9 VSC-HVDC system

表 1 VSC-HVDC 系统运行参数

Table 1 VSC-HVDC system operating parameters

参数	数值
直流电压/kV	$\pm 200$
额定容量/MVA	400
直流电容/ $\mu$ F	200
直流线路电阻/ $(\Omega/\text{km})$	0.013 9
线路电感/ $(\text{mH}/\text{km})$	0.159
线路长度/km	100

故障后 2 ms 投入, 并且设定 HDCCB 故障电流转移时间为 2 ms<sup>[30]</sup>, HDCCB 最大开断电流为 9 kA。

### 4.1 限流电路有效性仿真验证

表 2 给出了限流电路仿真参数。为验证所提限流电路的有效性, 进行了以下四组系统短路仿真:

- (A) 无限流电路;
- (B) 仅有限流 SI-SFCL 单元;
- (C) 含有限流 SI-SFCL 单元和限流  $R_1$  单元;
- (D) 采用本文所提限流电路, 即包括限流 SI-SFCL 单元、限流  $R_1$  单元和吸能  $R_2$  单元。

结果如图 10 所示。

由图 10(a)可以看出, 在无限流电路情况下, 故障电流在 3 ms 内由额定值 1 kA 上升至最大值 42 kA,

表 2 限流电路参数

Table 2 Parameters of proposed current-limiting circuit

参数	数值
$L_H/\text{mH}$	120
$L_L/\text{mH}$	25
$B/\text{T}$	1.78
$R_1/\Omega$	10
$R_2/\Omega$	30

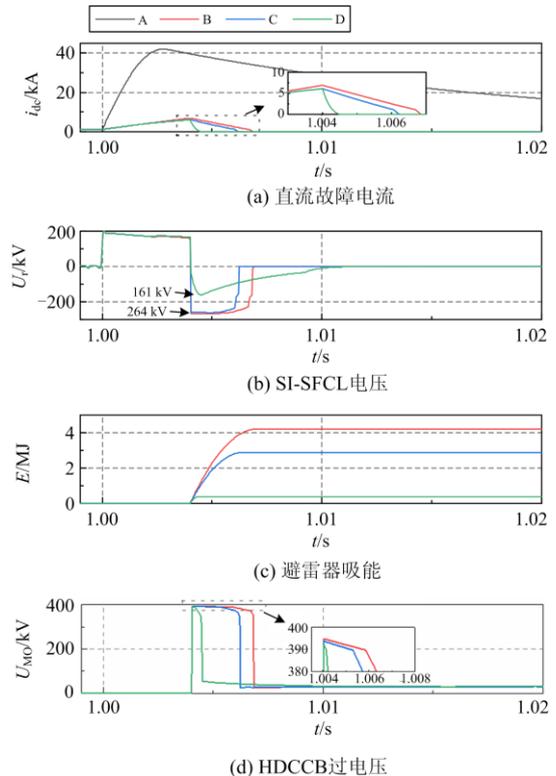


图 10 限流电路有效性验证仿真结果

Fig. 10 Simulation results of effectiveness of proposed current-limiting circuit

远超出了 HDCCB 的最大开断电流 9 kA, HDCCB 不能完成故障线路隔离。SI-SFCL 及  $R_1$  接入故障回路后, 故障电流的上升速度被显著抑制了, 并且故障电流幅值也被限制在 HDCCB 的开断容量之内。通过对比 B、C、D 三组仿真结果可以看到, 接入吸能电阻  $R_2$  后, 故障线路隔离时间(即  $t_4 - t_0$ )缩短约 2 ms。

由以上分析可知, 在无限流电路(A 组)情况下, HDCCB 未能完成故障切除, 因此不考虑该情况下 SI-SFCL 两端电压、HDCCB 中避雷器吸收的能量以及 HDCCB 的过电压。

对于 SI-SFCL 而言, 加入吸能电阻  $R_2$  后, 在故障线路切除过程中其最大过电压由 264 kV 下降至 161 kV, 下降率达 39%, 显著降低了 SI-SFCL 的绝缘设计要求, 如图 10(b)所示。

B、C、D 三组仿真的避雷器吸能如图 10(c)所示。仅有 SI-SFCL 时, 避雷器吸能为 4.2 MJ, 加入  $R_1$  后, 避雷器吸能减少至 2.9 MJ, 再加入  $R_2$ , 避雷器吸能仅 0.38 MJ。可以看出, 限流电阻  $R_1$  和吸能电阻  $R_2$ (尤其是  $R_2$ )能有效减少避雷器吸能。

由图 10(d)可见, 本文所提限流电路有助于降低 HDCCB 的过电压, 从而减少 HDCCB 的制造成本。

## 4.2 限流电路中电阻的影响

本节主要探究不同阻值的限流电阻  $R_1$  与吸能电阻  $R_2$  对所提限流电路作用效果的影响, SI-SFCL 参数与 4.1 节中保持一致。

### 4.2.1 限流电阻 $R_1$ 的影响

设置  $R_2$  为 30  $\Omega$ , 图 11 为不同阻值  $R_1$  对限流电路作用效果的影响仿真结果。当  $R_1$  从 0  $\Omega$  增大到 20  $\Omega$  时: HDCCB 所需开断的故障电流幅值由 6.9 kA 降低至 5.4 kA, 但是故障电流下降到零的时刻基本一致, 表明故障线路隔离时间基本相同; 避雷器吸能由 548 kJ 减少到 288 kJ。显然, 随着  $R_1$  阻值的增大, 故障电流的上升率、幅值和避雷器吸能均减小了, 但是增大  $R_1$  对于加快故障线路隔离作用不大。

图 11(c)为流经吸能  $R_2$  单元的电流  $i_R$ 。在  $t = 1.004$  s 时, MOV 投入, 吸能  $R_2$  单元导通, 故障电流迅速分流至吸能单元。在  $t \approx 1.0045$  s 故障线路经 HDCCB 隔离, 但此时 SI-SFCL 中仍存在剩余电流, 该电流继续经  $R_2$  释放, 当剩余电流减小至 1.1 kA ( $I_{No}$ ) 后, SI-SFCL 恢复小电感运行, 电流衰减速度加快。对比不同阻值  $R_1$  的结果可以发现, 随着  $R_1$  的增大, SI-SFCL 中剩余能量释放速度加快, 意味着 SI-SFCL 恢复更迅速。

### 4.2.2 吸能电阻 $R_2$ 的影响

设置  $R_1$  为 10  $\Omega$ , 不同阻值  $R_2$  对限流电路作用

效果的影响仿真结果如图 12 所示。当  $R_2$  分别为 10  $\Omega$ 、20  $\Omega$ 、30  $\Omega$ 、50  $\Omega$ 、100  $\Omega$  时, 故障线路隔离时间分别为 4.3 ms、4.35 ms、4.5 ms、5.3 ms、6 ms, 避雷器吸收的能量分别为 289 kJ、327 kJ、388 kJ、683 kJ、1 433 kJ。可见,  $R_2$  越小, 故障线路隔离时间越短, 避雷器吸能越少。然而, 由图 12(c)吸能  $R_2$  单元电流持续时间可知,  $R_2$  越小, SI-SFCL 恢复时间越长, 这与第 2 部分理论分析一致。

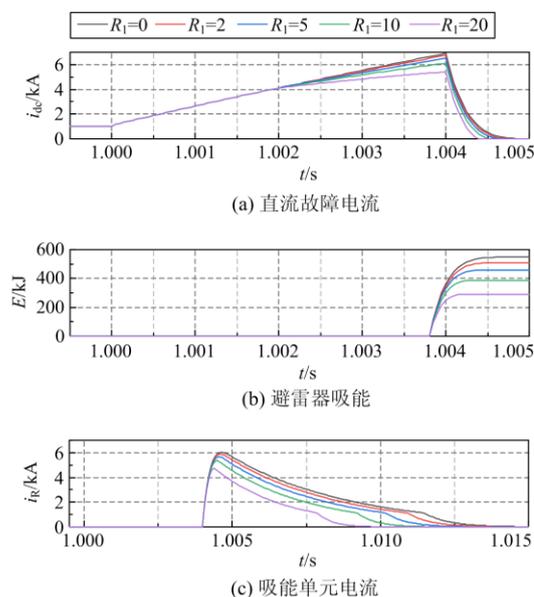


图 11 不同阻值  $R_1$  对限流电路作用效果影响仿真结果  
Fig. 11 Simulation results of different resistance values  $R_1$  on the effect of proposed current-limiting circuit

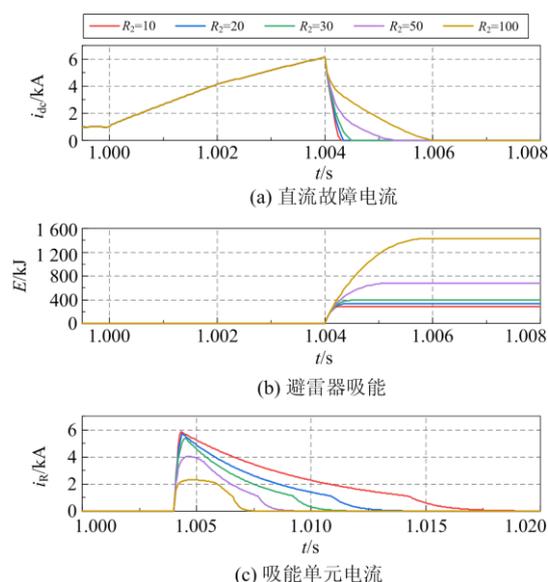


图 12 不同阻值  $R_2$  对限流电路作用效果影响仿真结果  
Fig. 12 Simulation results of different resistance values  $R_2$  on the effect of proposed current-limiting circuit

### 4.3 与其他直流限流电路的对比验证

在相同故障条件下，将本文所提限流电路与文献[19]所提限流电路、文献[23]所提限流电路在所搭建的直流系统中进行对比仿真。仿真参数如表 3 所示，结果如图 13 所示。

表 3 三种限流电路仿真参数

Table 3 Simulation parameters of three current-limiting schemes

限流电路	限流电感/mH	限流电阻 $R_1/\Omega$	吸能电阻 $R_2/\Omega$
文献[19]	120	—	—
文献[23]	120	—	30
本文	25~120	10	30

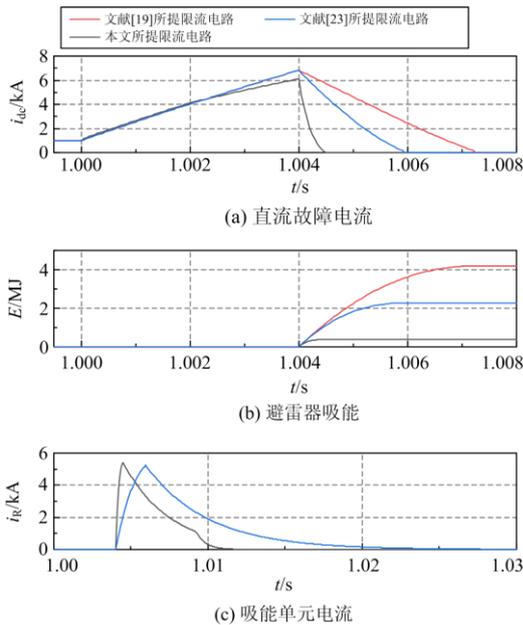


图 13 对比仿真结果

Fig. 13 Simulation results of comparison

由图 13(a)和图 13(b)可以看到，相比于文献[19,23]的故障电流开断值 6.83 kA，在本文所提限流电路的作用下，其相应值仅为 6.11 kA。同时相比于文献[19]的故障隔离时间 7.25 ms、文献[23]的故障隔离时间 5.95 ms，本文提出的限流电路故障隔离时间仅 4.5 ms，时间缩短率分别约为 37.9%和 24.4%。并且本文所提限流电路在故障开断过程中避雷器的吸能压力更小一些。

由于本文及文献[23]增加了吸能电阻，会导致在 HDCCB 隔离故障线路后，SI-SFCL 或电感中仍存在剩余能量，该能量需经过吸能电阻  $R_2$  释放。图 13(c)给出了流经吸能电阻  $R_2$  的电流  $i_R$  曲线。显然，本文所提限流电路的剩余能量释放更加迅速。这是

由于相比于文献[23]：(1) 本文所提限流电路在 SI-SFCL 释能阶段形成的独立环路中，除存在吸能电阻  $R_2$  外，还包括限流电阻  $R_1$ ， $R_1$  加速了能量释放；(2) 由于本文采用 SI-SFCL，当剩余电流降至 1.1 kA 时，铁心进入正向饱和区，SI-SFCL 由大电感恢复小电感运行，SI-SFCL 电感值的变化也加速了剩余电流的衰减。三种限流电路性能比较如表 4 所示。

表 4 三种限流电路性能比较

Table 4 Performances comparison of three current-limiting schemes

限流电路	故障电流峰值/kA	故障线路隔离时间/ms	MOV 吸收能量/MJ	剩余能量释放时间/ms
文献[19]	6.83	7.25	4.20	—
文献[23]	6.83	5.95	2.28	23.50
本文	6.11	4.50	0.39	6.85

因此，相比于文献[19,23]，本文所提限流电路在系统故障时，限流能力更强、故障切除速度更快、避雷器开断压力更小，并且 SI-SFCL 恢复迅速。

## 5 结论

本文提出一种基于饱和铁心型超导限流器的混合直流限流电路，介绍该限流电路的工作原理、参数设计方法，并对其作用效果在 VSC-HVDC 系统中进行了仿真验证，得到如下结论：

(1) 本文所提限流电路在系统正常运行时呈现低阻抗，在系统发生故障时能够迅速呈现高阻抗，且实现阻感复合限流，既能抑制故障电流上升率，又能限制故障电流幅值；

(2) 在配合混合式直流断路器开断过程中，所提限流电路可以加速故障线路隔离速度，减少避雷器需要耗散的能量，并且限流电阻  $R_1$  越大、吸能电阻  $R_2$  越小，效果越明显；

(3) 故障线路隔离后，饱和铁心型超导限流器可以借助限流电阻  $R_1$  和吸能电阻  $R_2$  泄能，实现快速自恢复。

## 参考文献

[1] 徐政, 屠卿瑞, 管敏渊, 等. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.

[2] 杨楠, 崔伟, 王智伟, 等. 含风电特高压直流系统单极接地故障暂态特性研究[J]. 高压电器, 2020, 56(2): 142-149, 157.

YANG Nan, CUI Wei, WANG Zhiwei, et al. Research on transient characteristics of monopolar grounding fault for wind power integrated UHVDC[J]. High Voltage

- Apparatus, 2020, 56(2): 142-149, 157.
- [3] 武建卫, 邵剑峰. 计及波速变化的反行波直流输电线路故障测距方法[J]. 中国电力, 2021, 54(5): 121-128.  
WU Jianwei, SHAO Jianfeng. Fault location of DC transmission lines based on backward waves considering wave speed changes[J]. Electric Power, 2021, 54(5): 121-128.
- [4] 吕思卓, 舒展, 宋新甫, 等. 柔性直流接入对弱受端电网恢复特性影响及优化措施[J]. 电力工程技术, 2020, 39(1): 31-37.  
LÜ Sizhuo, SHU Zhan, SONG Xinfu, et al. Influence of VSC-HVDC interconnection on recovery characteristics of weak receiving end grid fault and optimization measure[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1): 31-37.
- [5] 刘旭斐, 吴琛, 张丹, 等. 考虑后效性的柔性直流输电黑启动方案评估方法[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(6): 110-116.  
LIU Xufei, WU Chen, ZHANG Dan, et al. Evaluation method of blackstart scheme with VSC-HVDC considering aftereffects[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(6): 110-116.
- [6] MUNIAPPAN M. A comprehensive review of DC fault protection methods in HVDC transmission systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 1-20.
- [7] 包宇喆, 陶春蓉, 梅志强, 等. 电阻型故障限流器电流转移特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(15): 27-33.  
BAO Yuzhe, TAO Chunrong, MEI Zhiqiang, et al. Research on the vacuum arc current commutation characteristic of the resistive fault current limiter[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15): 27-33.
- [8] 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.
- [9] SONG Meng, MA Tao, SHENG Chao, et al. The parameter design and system simulation of 160-kV/1-kA resistive-type superconducting DC fault current limiter[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(5): 1-6.
- [10] XIANG Bin, GAO Lei, LIU Zhiyuan, et al. Short-circuit fault current-limiting characteristics of a resistive-type superconducting fault current limiter in DC grids[J]. Superconductor Science and Technology, 2020, 33(2).
- [11] QIU Qingquan, XIAO Liye, ZHANG Jingye, et al. Design and test of 40-kV/2-kA DC superconducting fault current limiter[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2020, 30(6): 1-5.
- [12] ZHANG Guoming, WANG Haonan, QIU Qingquan, et al. Recent progress of superconducting fault current limiter in China[J]. Superconductor Science and Technology, 2021, 34(1).
- [13] 袁晓冬, 史明明, 杨景刚, 等. 基于 LCL 故障电流控制器的故障快速检测[J]. 电力工程技术, 2021, 40(4): 67-74.  
YUAN Xiaodong, SHI Mingming, YANG Jinggang, et al. Fault detection method based on LCL fault current controller[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(4): 67-74.
- [14] LI Botong, JING Fangjie, LI Bin, et al. Research on the parameter matching between active SI-SFCL and DC circuit breaker in DC systems[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(2): 1-5.
- [15] LIANG Siyuan, TANG Yuejin, REN Li, et al. Tests and analysis of a small-scale hybrid-type DC SFCL prototype[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28(4): 1-6.
- [16] 刘云飞, 周启文, 方太勋, 等. 故障限流器控制系统的设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 150-156.  
LIU Yunfei, ZHOU Qiwen, FANG Taixun, et al. Design and implementation of control system for fault current limiter[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 150-156.
- [17] 许建中, 武董一, 俞永杰, 等. 电流换相 H 桥型混合式直流故障限流器[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(增刊 1): 235-242.  
XU Jianzhong, WU Dongyi, YU Yongjie, et al. A current-commutation-based H-bridge type hybrid fault current limiter[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(S1): 235-242.
- [18] LI Bin, WANG Changqi, WEI Ziqiang, et al. Technical requirements of the DC superconducting fault current limiter[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 29(5): 1-5.
- [19] 贺之渊, 陆晶晶, 刘天琪, 等. 柔性直流电网故障电流抑制关键技术与展望[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(2): 173-183.  
HE Zhiyuan, LU Jingjing, LIU Tianqi, et al. Key technologies and prospect of fault current suppression in flexible DC power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(2): 173-183.

- [20] 王辉, 马超, 郝全睿, 等. 一种强制换流型混合式高压直流断路器方案[J]. 高电压技术, 2019, 45(8): 2425-2433.  
WANG Hui, MA Chao, HAO Quanrui, et al. A scheme of forced converter hybrid HVDC circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8): 2425-2433.
- [21] 潘垣, 陈立学, 袁召, 等. 针对直流电网故障的限流与限能技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 2006-2016.  
PAN Yuan, CHEN Lixue, YUAN Zhao, et al. Research on current limiting and energy limiting technology for DC power grid fault[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 2006-2016.
- [22] AHMAD M, WANG Zhixin, ZHANG Yong. An improved fault current limiting circuit for VSC-HVDC transmission system[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 118.
- [23] 刘剑, 何雨微, 徐祥海, 等. 柔性直流电网故障限流技术分析探讨[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(4): 9-16.  
LIU Jian, HE Yuwei, XU Xianghai, et al. Analysis and discussion of fault current limiting technology in flexible DC grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(4): 9-16.
- [24] 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.
- [25] 袁佳歆, 陈鹤冲, 陈凡, 等. 一种快速响应直流限流器拓扑结构与参数设计[J]. 电工技术学报, 2021, 36(8): 1646-1657.  
YUAN Jiaxin, CHEN Hechong, CHEN Fan, et al. Topology and parameter design of a fast response DC current limiter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(8): 1646-1657.
- [26] 信赢. 超导限流器综述[J]. 南方电网技术, 2015, 9(3): 1-9.  
XIN Ying. Review on superconducting fault current limiters[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(3): 1-9.
- [27] 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.
- [28] LI Botong, JING Fangjie, LI Bin, et al. Study of the application of active saturated iron-core superconductive fault current limiters in the VSC-HVDC system[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28(4): 1-6.
- [29] 周光阳, 李妍, 何大瑞, 等. 含限流器的多端柔直系统故障保护策略[J]. 电工技术学报, 2020, 35(7): 1432-1443.  
ZHOU Guangyang, LI Yan, HE Darui, et al. Protection scheme for VSC-MTDC system with fault current limiter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(7): 1432-1443.
- [30] HFNER J, JACOBSON B. Proactive hybrid HVDC breakers—a key innovation for reliable HVDC grids[C] // Integrating Supergrids and Microgrids International Symposium, September 13-15, 2011, Bologna, Italy: 1-9.
- [31] 陈磊, 何慧雯, 王磊, 等. 基于限流器与断路器协调的混合直流输电系统故障隔离方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 119-127.  
CHEN Lei, HE Huiwen, WANG Lei, et al. Fault isolation method of a hybrid HVDC system based on the coordination of a fault current limiter and a DC circuit breaker[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 119-127.
- [32] LIU Jian, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. A hybrid current-limiting circuit for DC line fault in multi-terminal VSC-HVDC system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(7): 5595-5607.
- [33] LI Botong, CUI Hangqi, 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): 411-421.

收稿日期: 2021-06-09; 修回日期: 2021-10-25

作者简介:

路佳宁(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为超导限流器、柔性直流输电技术; E-mail: 975308494@qq.com

信赢(1953—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为超导限流器、超导储能、超导磁悬浮; E-mail: yingxin@tju.edu.cn

王常骥(1990—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为超导限流器、柔性直流系统保护与控制。E-mail: wangchangqi79@126.com

(编辑 葛艳娜)