

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.03.012

## 一种双向阻感型直流限流器的分析与设计

李鑫<sup>1</sup>, 陈权<sup>1</sup>, 陈忠<sup>2</sup>, 王群京<sup>1</sup>, 鞠鲁峰<sup>1</sup>

(1. 安徽大学, 合肥 230601; 2. 安徽省电力有限公司电力科学研究院, 合肥 230601)

**摘要:** 柔性直流输电系统故障电流上升速度快、幅值大, 现有的直流断路器(DCCB)故障切断速度、开断容量受到了极大的挑战。基于此, 提出一种主要由换流支路和阻感限流支路所构成的直流限流器, 利用换流支路将故障电流转移至阻感限流支路上, 实现阻感限流, 并通过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, 结合该阻感型直流限流电路与混合式直流断路器的配合策略, 分阶段对该阻感型直流限流电路的工作原理进行理论分析, 通过数学推导给出所提阻感型直流限流电路的参数设计原则。最后, 对所提阻感型直流限流电路的正确性和有效性进行了仿真验证。结果表明, 所提阻感型直流限流电路能有效抑制故障电流、快速隔离故障线路、减少避雷器吸能压力。

**关键词:** 直流故障; 直流限流器; 直流断路器; 参数设计

### Analysis and Design of A Bidirectional Resistive-inductive DC Current Limiter

LI Xin<sup>1</sup>, CHEN Quan<sup>1</sup>, CHEN Zhong<sup>2</sup>, WANG Qunjing<sup>1</sup>, JU Lufeng<sup>1</sup>

(1. Anhui University, Hefei 230601, China; 2. Anhui Electric Power Co., Ltd., Electric Power Science Research Institute, Hefei 230601, China)

**Abstract:** The rapid rise and large amplitude of fault current in VSC-HVDC transmission system pose significant challenges to the fault interruption speed and breaking capacity of existing DC circuit breaker (DCCB). Based on this, a DC current limiter which is mainly composed of the commutation branch and the resistive-inductive current limiting branch is proposed. The fault current is transferred to the resistive-inductive current limiting branch by the commutation branch to achieve the resistive-inductive current limiting and reach the purpose of accelerating the clearing of the fault current and relieving the breaking pressure of the DC circuit breaker through the energy absorption resistance. According to the transient characteristics of DC fault and also in combination with the coordination strategy of the resistive-inductive DC current-limiting circuit and hybrid DC circuit breaker, the working principle of the resistive-inductive DC current-limiting circuit is analyzed theoretically in stages, and the parameter design principle of the proposed resistive-inductive DC current-limiting circuit is given through mathematical derivation. Finally, the correctness and effectiveness of the proposed resistive-inductive DC current-limiting circuit are verified by simulation. The results show that the proposed resistive-inductive DC current-limiting circuit can effectively suppress the fault current, quickly isolate the fault line and reduce the energy absorption pressure of the arrester.

**Key words:** DC failure; DC current limiter; DC circuit breaker; parameter design

## 0 引言

多端柔性直流输电可以实现分布式能源的平

滑接入、无功功率,有功功率的解耦控制,输电损耗小且能远距离输电,不存在换相失败和无功补偿等问题,被认为是构建未来全球能源互联网的关键技

收稿日期:2025-08-11; 修回日期:2025-10-21

基金项目:国家电网有限公司总部管理科技项目(5500-202220110A-1-1-ZN)。

Project Supported by Headquarters Management Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(5500-202220110A-1-1-ZN).

术<sup>[1-5]</sup>。在系统发生短路故障时,由于柔性直流电力系统没有“自然过零点”,传统的交流断路器很难开断直流电流,如果依靠交流侧的交流断路器,交流侧电流达到过零点需要几十 ms。然而直流系统惯性很小,导致直流故障电流迅速上升,整个直流系统无法承受数十 ms 的故障电流。巨大的冲击电流会给换流站的安全带来极大的挑战<sup>[6-8]</sup>。因此,工程上大多选择能够在 5 ms 内切断故障电流的直流断路器(DCCB)<sup>[9-10]</sup>。随着多端柔性直流输电传输容量,电压等级的不断提高,直流故障电流上升率进一步提高,电力电子装置因过流达到闭锁阈值的时间也进一步缩短<sup>[11-13]</sup>,给 DCCB 开断速度、开断容量提出了更高的要求<sup>[14-15]</sup>。较高的直流断路器过电压、能量吸收和电流峰值将会增加 DCCB 的建造成本<sup>[16-17]</sup>。附带直流限流器的 DCCB 对故障电流实行“先限流后切断”的方式,降低了 DCCB 的技术要求和制造成本。

为了降低故障电流上升速度,传统方法是将平波电抗器作为直流限流器<sup>[18]</sup>。然而,平波电抗器的电感是一个小的固定值,导致弱电流效应。事实上,柔性直流输电系统的电感在正常阶段不能太大,过大的电感会对直流系统的动态稳定有隐患<sup>[19]</sup>。因此,作为直流限流器的电感应该是可变的,这意味着电感在正常阶段应较小,在故障限流阶段应较大。现有的直流限流器中超导限流器<sup>[20-21]</sup>恢复速度较慢,高度依靠复杂的冷却技术且因造价昂贵难以得到推广,对于固态限流器<sup>[22-23]</sup>,可靠性高,响应速度快,但

为了适用于高电压、大电流场合,固态限流器中需要串并联大量的电力电子装置,面临着均流、均压问题,且通态损耗大,经济性不高。对于磁通耦合型直流限流器<sup>[24]</sup>,通过两个紧密的耦合的线圈组成,通过磁通耦合和去耦控制原理实现,其原理简单,但需要故障控制装置,响应速度慢。

文[25]提出一种阻容型直流限流器,该拓扑使用大量晶闸管和 IGBT,各电力电子器件导通、关断控制较为复杂,难以应用于实际中。文[26]提出一种快速响应直流限流器拓扑,通过磁耦合将故障电流引入到辅助支路中,避免大电感长期投入,但永磁体退磁问题未能得到解决。文[27]采用 H 桥电路结构,利用电容实现故障电流换流,可实现双向限流,但整套装置所使用的晶闸管较多,工程造价昂贵。

针对以上问题,文中提出一种基于饱和铁心型和换流支路所构成的限流电路,通过将故障电流引入到辅助限流支路上配合直流断路器,加速故障线路隔离,减小避雷器的吸能压力。首先,对双向直流限流器拓扑进行了分析,其次介绍双向阻感型直流限流器(BFCL)原理,指出设计原则,最后在 PSCAD/EMTDC 中搭建仿真模型,研究不同参数对短路电流影响。

### 1 双向直流限流器拓扑及动作过程

双向阻感型直流限流器拓扑图见图 1,包括主限流模块、辅助限流模块和耗能模块。动作过程见图 2。

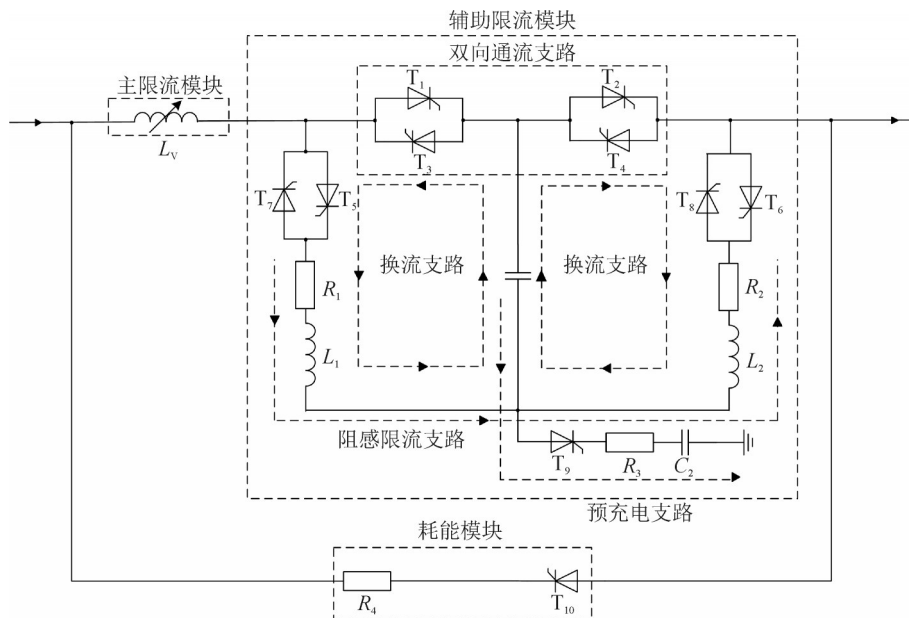


图 1 双向阻感型直流限流器拓扑

Fig. 1 Bidirectional resistive inductive DC current limiter topology

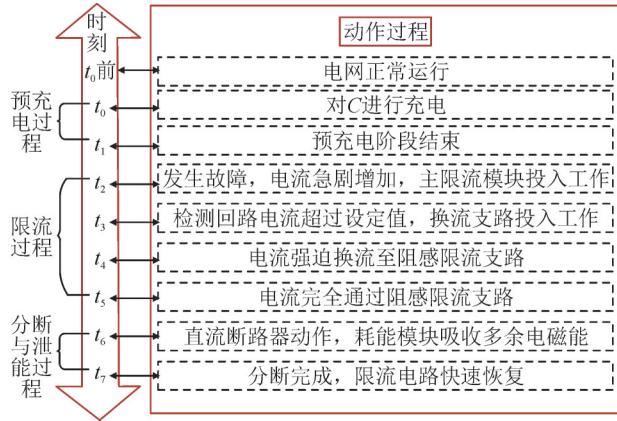


图2 双向阻感型直流限流器动作时刻图

Fig. 2 Bidirectional resistive inductive DC current limiter action time diagram

辅助限流模块包括双向通流支路、预充电支路、换流支路和阻感限流支路。双向通流支路由晶闸管( $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$ )组成,其中晶闸管 $T_1$ 、 $T_3$ 反并联,晶闸管 $T_2$ 、 $T_4$ 反并联,预充电支路包括换流电容 $C_1$ ,调压电容 $C_2$ ,晶闸管 $T_9$ 和充电电阻 $R_3$ ,在限流器投入工作前需要对换流电容预充一部分电压。通过换流电容中的电流将故障电流强迫换流至阻感限流支路,阻感限流支路由晶闸管( $T_5$ 、 $T_6$ 、 $T_7$ 、 $T_8$ )、限流电阻( $R_1$ 、 $R_2$ )、限流电感( $L_1$ 、 $L_2$ )组成,其中晶闸管 $T_5$ 、 $T_7$ 反并联,晶闸管 $T_6$ 、 $T_8$ 反并联。

主限流模块为饱和铁心型限流器,由二极管桥路、直流绕组、励磁绕组、直流电源和铁心组成,见图3。

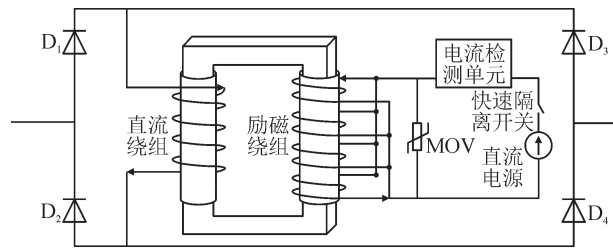


图3 主限流模块拓扑图

Fig. 3 Primary current limiting module topology

图3中,铁心作为整个主限流模块核心,其饱和程度在一定程度上影响限流器的阻抗特性。 $N_1$ 、 $i_1$ 为直流绕组的匝数;电流 $N_2$ 、 $i_2$ 为励磁绕组的匝数。电流、铁心的磁化曲线见图4。铁心的磁感应强度记为 $B_0$ ,对应的磁场强度记为 $H_0$ 。直流绕组与励磁绕组产生的磁场方向相反,相互抵消。

直流绕组为铜绕组,通过二极管桥路与系统相连,励磁绕组为超导绕组,直流电源为其提供偏置电流,快速隔离开关在发生短路故障时动作,保护直流电源,超导材料可以有效降低励磁绕组的通态损耗。在电网系统中,电流可能为双向电流,即可

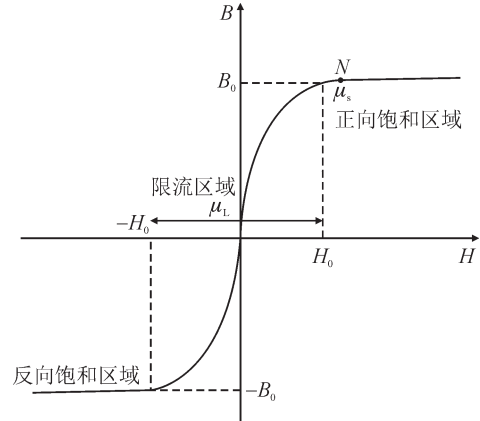


图4 铁心磁化曲线图

Fig. 4 Core magnetization curve

能从左往右流动,或者从右往左流动,通过二极管桥路使得电流流向固定,确保两个绕组产生的磁场方向相反。电网正常运行下,铁心处于正向饱和区域,即图4中右侧部分,假定铁心工作在 $N$ 点,铁心的磁导率小,记为 $\mu_s$ ;主限流模块对外呈现小电感状态,记为 $L_s$ 。当电流急剧增加时,铜绕组中的电流产生的磁场增加,迫使铁心退出正向饱和区域,即从 $N$ 点向限流区域移动,随着电流的增加,铁心工作于限流区域,铁心的磁导率增加,记为 $\mu_L$ ,主限流模块对外呈现大电感状态,记为 $L_L$ 。

耗能模块由晶闸管阀组 $T_{10}$ 和泄能电阻 $R_4$ 组成。当直流断路器开始工作时,通过导通耗能模块投入电路吸收多余的电磁能,缓解断路器压力的同时,也能使限流器快速恢复,投入下一次工作。

## 2 限流原理分析

阻感型直流限流器单端系统模型见图5。限流器电流路径见图6。

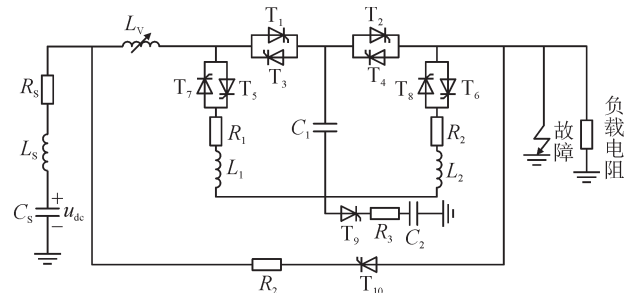


图5 单端系统模型

Fig. 5 Single-ended system model

1)预充电阶段( $t_0 \rightarrow t_1$ 时刻)。为正常情况下电流通路径见图6(a),在预充电阶段见图6(b)、(c)。导通晶闸管阀组 $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_9$ ,电流通过晶闸管阀组一部分电流流向负载,一部分流向换流电容。充电电阻 $R_3$ 作为保护元件,防止充电过程电流过大。假

定直流电压  $u_{dc}$ , 换流电容  $C_1$  和调压电容上  $C_2$  的电压分别为  $u_{c1}$ 、 $u_{c2}$ , 假定流过电容  $C_1$  的电流为  $i$ , 忽略晶闸管的损耗, 充电过程有

$$i = C_1 \frac{du_{c1}}{dt} = C_2 \frac{du_{c2}}{dt} \quad (1)$$

预充电阶段结束后

$$\begin{cases} u_{c1} = \frac{C_2}{C_1 + C_2} u_{dc} \\ u_{c1} + u_{c2} = u_{dc} \\ u_{c2} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} u_{dc} \end{cases} \quad (2)$$

因此, 需要合理设计  $C_1$ 、 $C_2$  的电容值, 使  $C_1$  上的电压在保证换流时有充分的能量的同时, 不会使晶闸管阀组反向击穿。

2) 限流阶段 ( $t_2 \rightarrow t_5$  时刻)。  $t_2$  时刻, 系统发生短路故障此阶段电流路径见图 6(d)、(f)。为了保证铁心工作在正向饱和区域, 根据安培环路定律可得

$$\frac{N_1 I_1 - N_2 I_2}{l} > H_0 \quad (3)$$

式(3)中,  $l$  为磁路长度。当故障电流急剧增加, 铁心退饱和和工作于限流区域, 主限流模块呈现大电感特性, 当铁心各处截面积相等时, 根据电路与磁

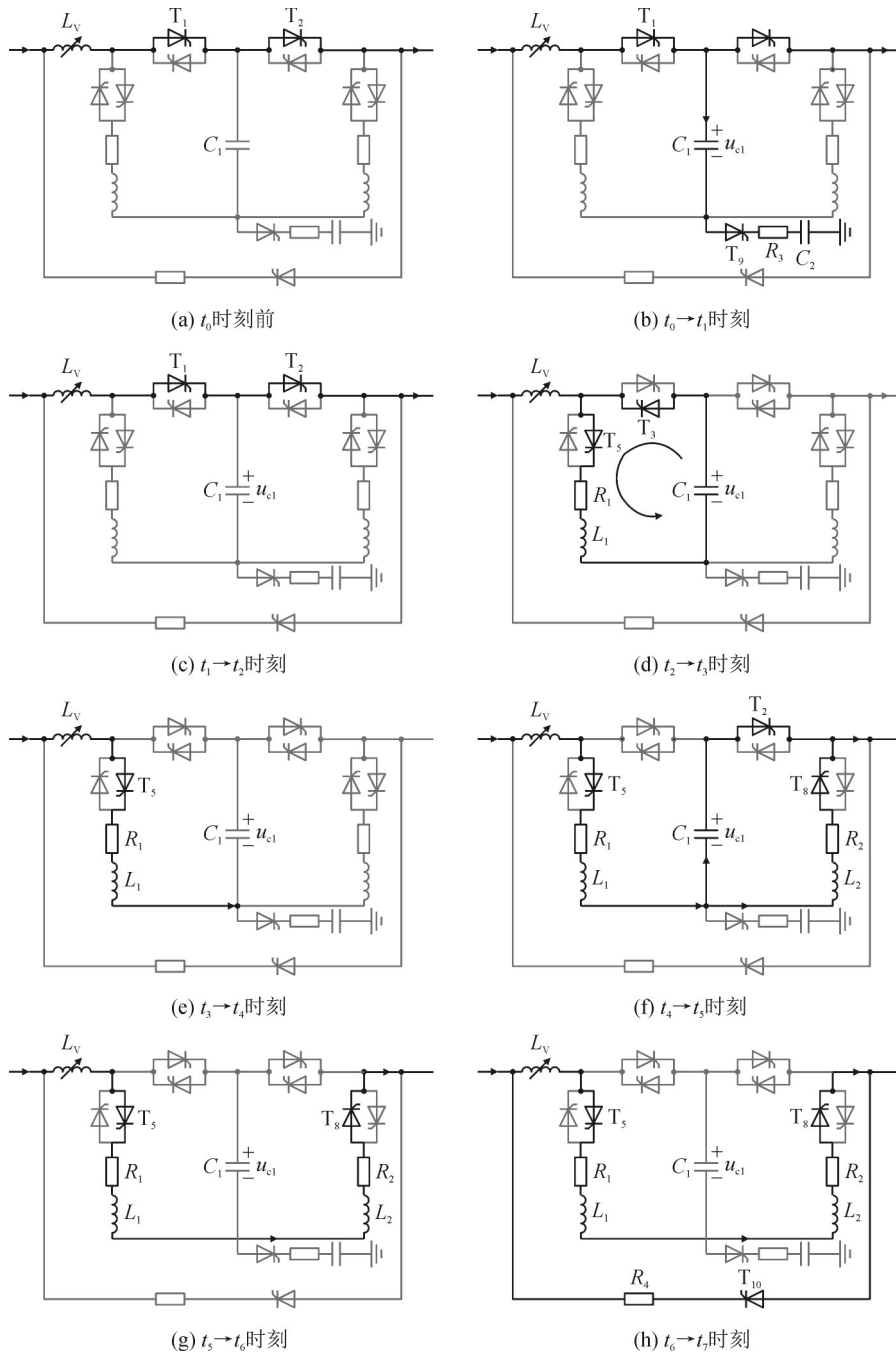


图6 限流器电流路径

Fig. 6 Current limiter current path

路方程,可以推导出主限流模块等效电感为

$$L_V = \frac{N_1^2 S}{l} \left( \mu - \frac{N_2 I_2 - N_1 I_1}{N_1} \frac{d\mu}{dI_1} \right) \quad (4)$$

式(4)中:  $L_V$  为主限流模块等效电感;  $S$  为铁心截面积;  $\mu$  为磁导率。短路电流通过晶闸管阀组流向故障处。以BFCL应用于模块化多电平(MMC)换流站为例,控制系统存在时延,可将换流站数学模型进行线性处理<sup>[28-29]</sup>,通过KVL定律可得

$$(L_S + L_V)C_S \frac{d^2 u_{dc}}{dt^2} + R_S C_S \frac{du_{dc}}{dt} + u_{dc} = 0 \quad (5)$$

式(5)中,  $R_S$ 、 $L_S$ 、 $C_S$  分别为换流站等效电阻、等效电感、等效电容。设初始条件  $u_{dc}(t_0) = U_0$ ,  $I_{dc}(t_0) = I_0$ ,  $t$  为线性变化时间,则:

$$I_{dc} = A \sqrt{\frac{C_S}{L_S + L_V}} e^{-\delta t} \sin(\omega t + \varphi - \theta) \quad (6)$$

$$A = \sqrt{U_0^2 + \left( \frac{\delta U_0}{\omega} - \frac{I_0}{\omega C_S} \right)^2} \quad (7)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{(L_S + L_V)C_S} - \left( \frac{R_S}{2(L_S + L_V)} \right)^2} \quad (8)$$

$$\delta = \frac{R_S}{2(L_V + L_S)} \quad (9)$$

$$\theta = \arctan \left[ \frac{\varpi}{\delta} \right] \quad (10)$$

$$\varphi = \arctan \left[ \frac{\omega C_S U_0}{\delta U_0 C_S - I_0} \right] \quad (11)$$

3)  $t_3$  时刻。系统检测到回路电流大于设定值  $I_N$ , 立即给晶闸管  $T_3$ 、 $T_5$  触发信号,同时给晶闸管  $T_8$  送入持续的触发信号。晶闸管因为一直承受换流电容  $C_1$  正向电压瞬间被导通,换流电容  $C_1$  持续放电,晶闸管  $T_2$  关断,强迫短路电流换流至阻感限流支路。

4)  $t_4$  时刻。换流电容放电阶段结束,此时,换流电容  $C_1$  反向充电,晶闸管  $T_8$  承受正向电压导通,根据KVL定律可得

$$\begin{cases} I_{dc} = i_c + i_2 \\ i_c = C_1 \frac{du_{c1}}{dt} \\ u_{c1} = i_2 R_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} \\ u_{dc} = (L_S + L_V + L_1 + L_2) \frac{dI_{dc}}{dt} + (R_S + R_1 + R_2) I_{dc} \end{cases} \quad (12)$$

5)  $t_5$  时刻。换流电容  $C_1$  充电完毕,故障电流完全经过限流电阻和限流电感,至此,限流器完全投入到故障电路中,系统等效电阻、电抗因限流器的投入而增大,故障电流峰值和上升速度均得到限制。

6)分断泄能阶段( $t_6 \rightarrow t_7$  时刻)。分断泄能阶段

电流路径见图6(g)、(h)。  $t_6$  时刻,直流断路器投入,耗能模块吸收多余的电磁能。耗能模块吸收的能量为

$$E = \int_{t_6}^{t_7} i_1^2 R_5 dt \quad (13)$$

7)  $t_7$  时刻。分断完成,直流限流器快速恢复。

### 3 参数设计

#### 3.1 主限流模块参数设计

由限流原理分析可知,主限流模块的限流能力与铁心的饱和程度有关,而铁心的饱和程度又受到励磁绕组上励磁电流的影响,因此不同的励磁电流将对应不同的铁心状态,从而产生不同的限流效果。

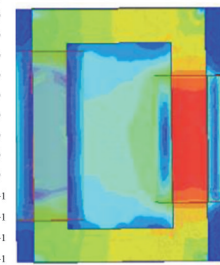
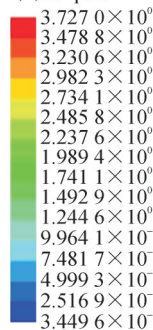
在Maxwell中搭建了BFCL的铁心模型,进一步分析限流过程中铁心磁通变化情况。主要参数见表1,短路故障发生后不同时段铁心磁通变化见图7。

表1 主限流模块Maxwell仿真参数

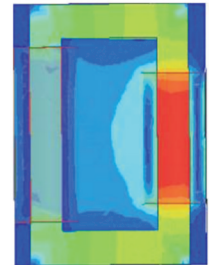
Table 1 Maxwell simulation parameters of the main current limiting module

参数	数值	参数	数值
直流绕组高度/m	1.0	铁轭高/m	2.0
励磁绕组高度/m	1.0	铁轭宽/m	1.0
线圈内径/m	0.4	窗高/m	0.5
线圈外径/m	0.6	窗宽/m	0.5
线圈材料	软铁	铁心材料	铜

单位: p.u.

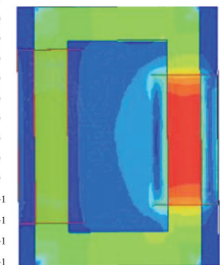
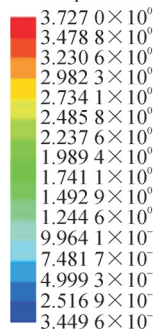


(a) 故障0.1 ms

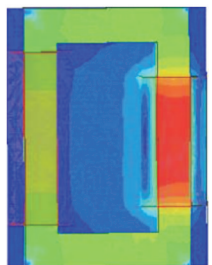


(b) 故障0.2 ms

单位: p.u.



(c) 故障0.3 ms



(d) 故障0.4 ms

图7 故障下的铁心磁通变化

Fig. 7 Change of core flux under fault

不同励磁电流下的铁心磁通变化见图8。从图8中可以看出,当励磁电流为0.4 kA时,在故障前铁心没能达到正向饱和,因此在故障仅2 ms时,便达到了反向饱和,未能充分利用铁心的限流区域。

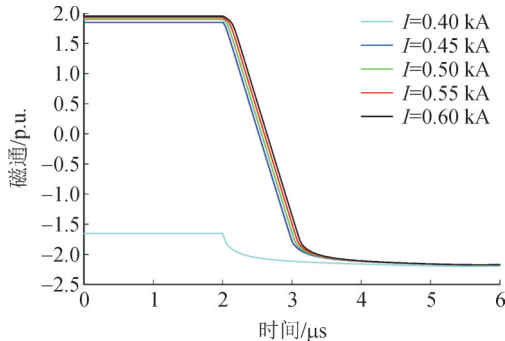


图8 不同励磁电流下的铁心磁通变化

Fig. 8 Changes in core flux under different excitation currents

当励磁电流为0.45 kA时,当铁心达到反向饱和时,短路电流达到最大值,此时断路器动作。

增大励磁电流为0.5、0.55、0.6 kA,可以从图8看出,限流过程中都存在着铁心反向饱和的情况,然而若想使铁心不发生反向饱和,则需要增大励磁磁场,即增大励磁电流,但更大的励磁电流会增大成本的同时,绝缘要求也会提高。因此,为了更有效地利用铁心,需要提供合适的励磁电流,使得在断路器开断时铁心达到反向饱和。

## 3.2 辅助限流模块参数设计

### 3.2.1 换流电容

换流电容对预充电电压的影响见图9。从之前的分析可知,过高的预充电电压会反向击穿晶闸管,过低的预充电电压则会没有充足的能量强迫电流转移至阻感限流之路,参照文[10]中提到的限流器在工程中应用注意事项,此处以50 kV作为预充电电压值。由图9可知,电容值越小,反向充电过程产生的振幅越大;电容值越大,阻感限流支路完全投入的时间越长,限流效果降低。因此,需要设计一个合适的电容值,有充足的能量使晶闸管 $T_3$ 成功导通同时,也能快速将电流强迫换流至阻感限流支路上。

### 3.2.2 晶闸管

在换流电容放电阶段( $t_3 \rightarrow t_4$ 时刻),为确保晶闸管 $T_1$ 能顺利关断,换流电容所能提供的反向电流应满足式(14)要求

$$u_{ci}/R_1 > I_{T_1} \quad (14)$$

式(14)中, $R_1$ 作为阻感限流支路电阻值,用来限制放电电流大小的同时,也限制短路电流峰值,若选

取过大,则需要更大的电容值或选取更高的预充电电压才能提供使晶闸管 $T_1$ 顺利关断的反向电流。

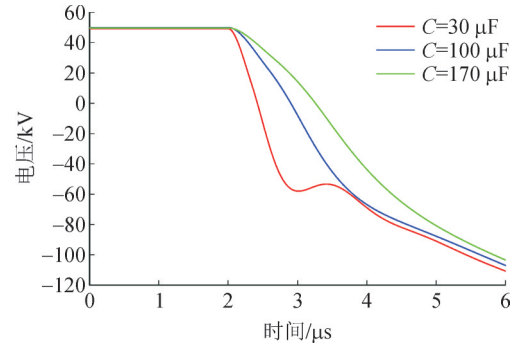


图9 换流电容对预充电电压的影响

Fig. 9 Effect of commutation capacitance on pre-charge voltage

### 3.2.3 限流电阻和限流电感

为了使不同方向的故障电流有相同的限流效果,故限流电阻 $R$ 应相同,限流电感 $L$ 应相同,即 $R_1$ 与 $R_2$ 相同、 $L_1$ 与 $L_2$ 相同。限流电阻的取值会影响到限流效果,若取值过小,则限流效果不明显,若取值过大,则会导致晶闸管 $T_1$ 无法关断,同时损耗也会增加,见图10。

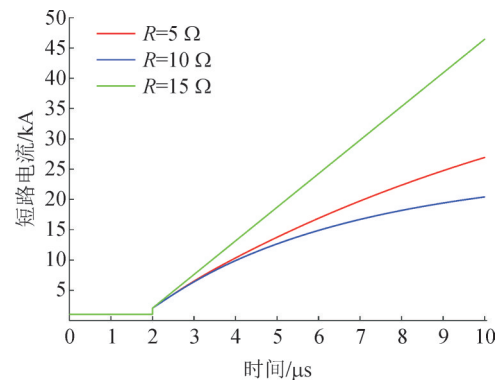


图10 不同限流电阻下的短路电流

Fig. 10 Short-circuit current with different current-limiting resistors

当限流电阻 $R \leq 10 \Omega$ 时,都能起到限流的效果,当限流电阻 $R > 15 \Omega$ 时,因为换流电容无法有效关断晶闸管,导致辅助限流模块无法投入,考虑到限流器的经济性和限流效果,需要合理安排电阻的取值。

限流电感的作用在于限制换流电容放电产生的放电电流,过小的限流电感无法起到保护作用,过大的限流电感则会导致晶闸管 $T_3$ 无法顺利开通。

### 3.2.4 辅助限流模块

从前文分析可知,换流电容 $C_1$ 的电容值、晶闸管选型、限流电阻 $R$ 、限流电感值 $L$ 都会影响到整个辅助限流模块是否能快速完全投入到限流电路中。本节的目的,在于满足直流断路器快速可靠开

断的情况下,寻找辅助限流模块的最优参数组合( $C_1$ 、 $R$ 、 $L$ ),以实现最小开断电流。为此给出如下3条约束条件与优化目标。

约束1为确保换流过程中晶闸管可靠关断,应满足如下条件。其中, $\alpha$ 作为裕量系数,应大于1,这里 $\alpha$ 取1.1。

$$u_{c1}/R_1 > \alpha I_{T_1} \quad (15)$$

约束2为确保快速关断,换流过程( $t_2 \rightarrow t_3$ )应在较短时间内完成。

约束3限流电阻,限流电感的组合参数影响整个限流过程,合理安排限流电阻,限流电感值能有效快速限制故障电流。

$$\begin{cases} LC_1 \frac{d^2 u_{c1}}{dt^2} + RC_1 \frac{du_{c1}}{dt} + u_{c1} = 0 \\ LC_1 p^2 + RC_1 p + 1 = 0 \\ p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \end{cases} \quad (16)$$

优化目标为辅助限流模块的最优参数组合,在5 ms时达到最小的开断电流。

在上述约束条件及优化目标指导下,得到的参数设计方法见图11。

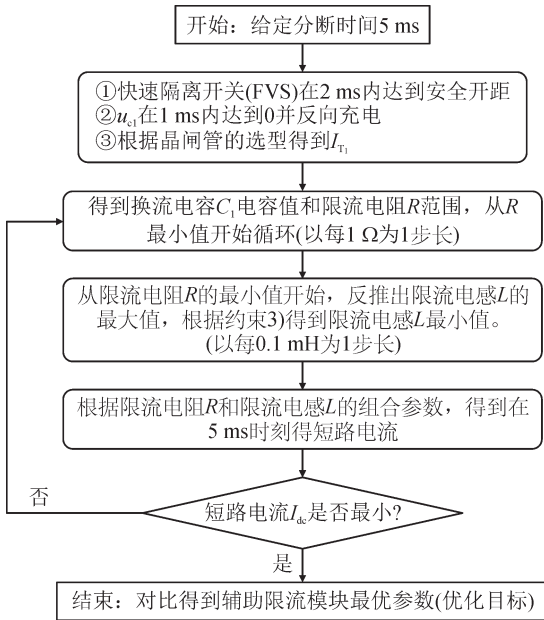


图11 辅助限流模块参数设计方法步骤

Fig. 11 Auxiliary current limiting module parameter design method steps

由上述的参数设计可以得到寻优过程下的辅助限流参数见图12。从图12中可知,限流电阻 $R=10\Omega$ ,限流电感 $L=1.5\text{mH}$ 时,短路电流最小,达到12.75 kA;当限流电阻 $R=11\Omega$ 时,只有主限流模块参与短路过程,辅助限流模块没有投入工作中,当电感值较大时,也会导致辅助限流模块无法工作,与之前的分析一致。

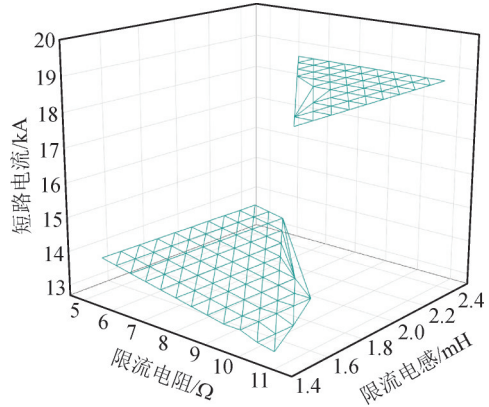


图12 寻优过程下的辅助限流参数

Fig. 12 Auxiliary current limiting parameters during the optimization process

## 4 仿真分析

### 4.1 双向阻感型直流限流器仿真

单端等效系统仿真模型及参数见图13、表2。

系统中各支路电流见图13(a),阻感型直流限流器控制方式见图13(b)。系统在 $t_2$ 时发生故障,故障电流开始快速上升,主限流模块投入工作,系统检测到故障电流达到设定值,给限流器发送动作指令, $t_3$ 时刻晶闸管 $T_3$ 被导通,换流电容 $C_1$ 开始放电,强迫电流转移至阻感限流支路上,换流电容放电结束,开始被故障电流反向充电,随后晶闸管 $T_8$ 被导通,部分电流流向 $R_2 L_2$ 支路上, $t_5$ 时刻,充电电流完毕,其所在的支路电流基本为0,故障电流全部流向阻感限流支路上。该仿真结果验证理论的正确性。

### 4.2 四端直流电网仿真

为验证文中提出的阻感型直流限流器的有效性,在PSCAD/EMTDC中搭建的四端口直流电网仿真模型见图14,直流电网参数见表3。由参数可知,换流站4出口处发生故障最为严重。以此为例,验证直流限流器的限流效果。

在1.0 s时,换流站4线路上发生接地故障,随后按上述过程投入所提限流器。在柔性直流电网中,故障后换流站中子模块电容迅速放电,故障电流急剧上升。BFCL配合DCCB切除故障线路时,令故障后5 ms断路器动作,避雷器参考电压为450 kV。故障电流见图15。没有限流器的情况下,短路电流在1.004 3 s时达到电流峰值为26.4 kA;有限流器参与下,短路电流在1.004 3 s时达到电流峰值为14.7 kA,限流指标<sup>[29]</sup> $CLI=43.13\%$ 。

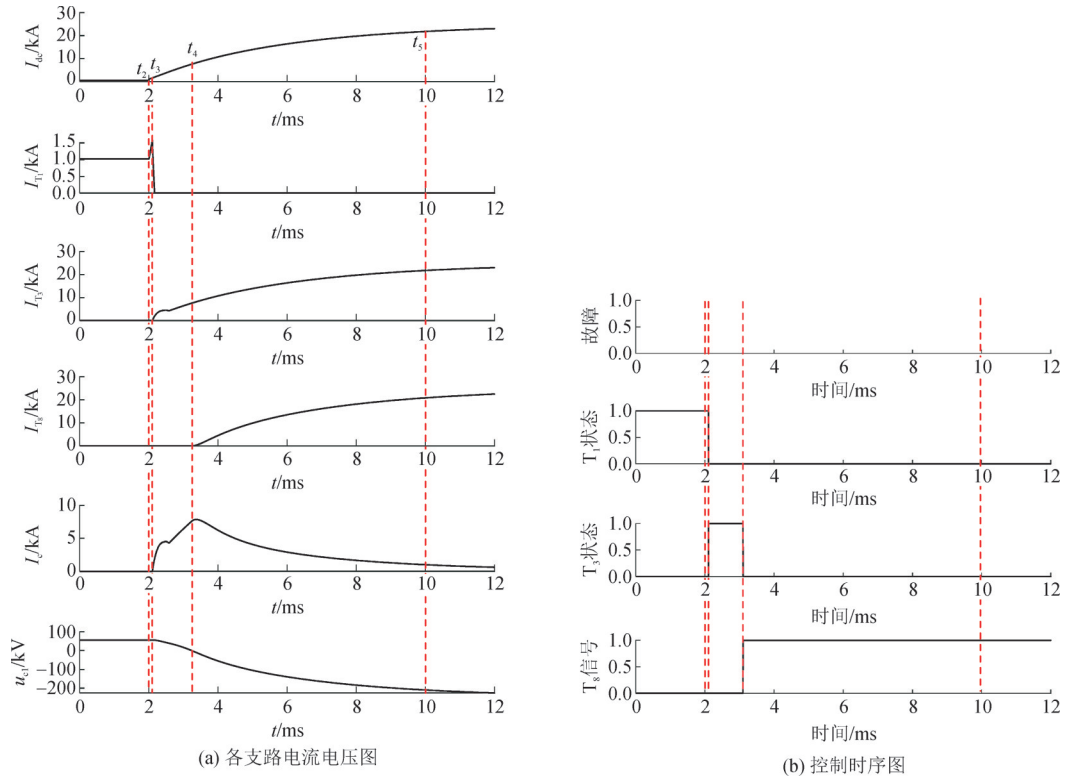


图13 双向阻感型限流器仿真

Fig. 13 Bidirectional fault current limiter simulation

表2 单端等效系统仿真参数

Table 2 Simulation parameters of single-ended equivalent system

单端系统参数	数值	辅助限流模块参数	数值
额定电压/kV	500	预充电电压/kV	50
额定电流/kA	1	限流电阻 $R_1/\Omega$	10.5
额定容量/MW	500	限流电阻 $R_2/\Omega$	10.5
换流站等效电感/mH	75	限流电感/mH	1.5
换流站等效电阻/ $\Omega$	5	限流电感/mH	1.5
换流站等效电容/ $\mu\text{F}$	8 000	换流电容/ $\mu\text{F}$	100

文中通过耗能模块加快故障电流隔离,减小避雷器耗能压力。故障过程避雷器吸能见图16。由图16可知,在无限流器的情况下,避雷器吸能在4 MJ;在有限流器的情况下,避雷器吸能仅200 J。有效的验证了文中提出的双向阻感型直流限流器的有效性。

### 5 结论

文章提出了一种适用于柔性直流输电系统的

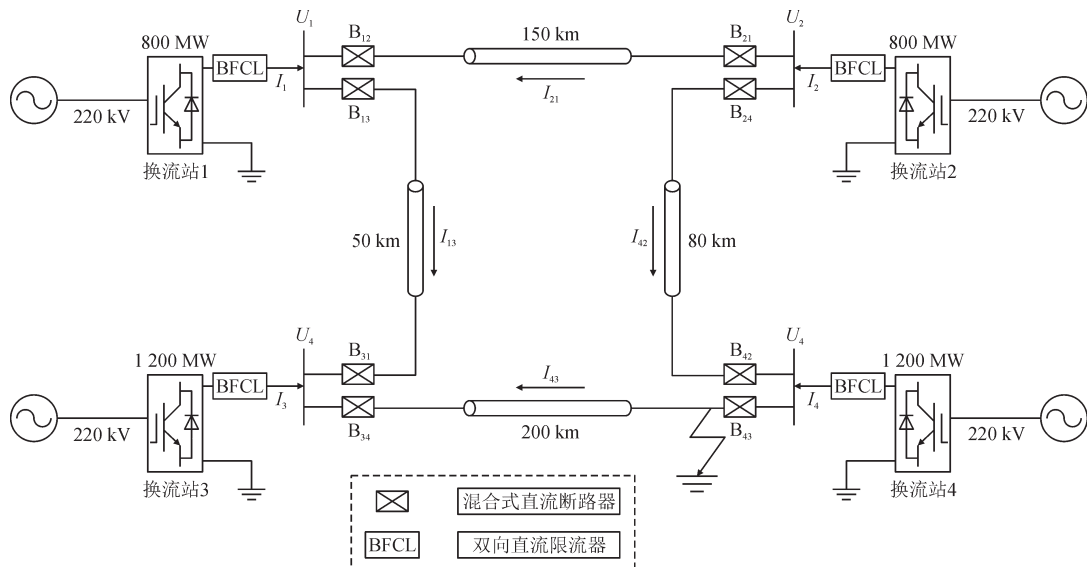


图14 柔性直流输电系统

Fig. 14 Flexible DC transmission system

表3 四端柔性直流电网参数

Table 3 Four-terminal flexible DC grid parameters

参数	数值
换流站1、换流站2有功功率/MW	800
换流站3、换流站4有功功率/MW	1 200
直流侧额定电压 $U_{dc}$ /kV	$\pm 400$
桥臂中子模块个数 $N$	300
换流站4额定电流 $I_{dc}$ /kA	2

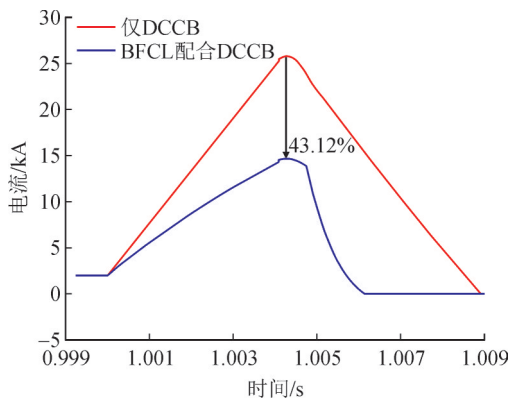


图15 故障过程短路电流图

Fig. 15 Fault process short-circuit current diagram

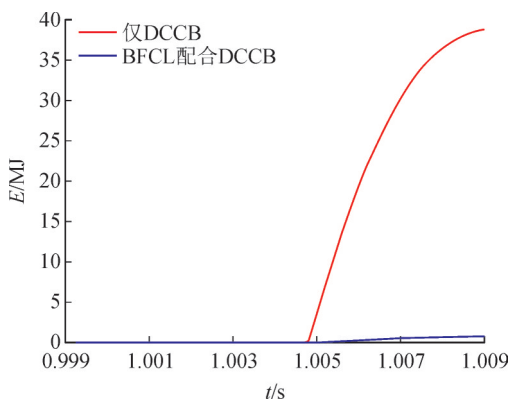


图16 故障过程避雷器吸能图

Fig. 16 Fault process arrester energy absorption diagram

阻感型直流限流器拓扑,对其拓扑结构、工作过程、电气应力以及参数设计进行了设计与分析,并在四端柔性直流电网中仿真验证,得出以下结论:

1)该拓扑利用换流电容实现特定晶闸管的关断和导通,最终使限流支路投入故障回路达到限流目的,控制逻辑简单。

2)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。

3)该限流器在抑制直流故障电流上升率的同时降低了故障电流幅值,限流指标<sup>[29]</sup> $CLI = 43.13\%$ 。

参考文献:

- [1] 徐 政. 柔性直流输电系统[M]. 北京:机械工业出版社,2013.  
XU Zheng.Flexible HVDC transmission system[M]. Beijing: China Machine Press,2013.
- [2] 张 智,徐永海,张世聪,等.直流配电网电能质量指标研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2025,53(3):172-187.  
ZHANG Zhi, XU Yonghai, ZHANG Shicong, et al.Review of power quality indices of a DC distribution network[J]. Power System Protection and Control,2025,53(3):172-187.
- [3] 李英量,孙 楠,王德明,等.含分布式储能系统的交直流配电网动态故障恢复策略[J]. 电力系统保护与控制,2024,52(18):179-187.  
LI Yingliang, SUN Nan, WANG Deming, et al.A dynamic fault recovery strategy for an AC/DC distribution network with distributed energy storage system[J]. Power System Protection and Control,2024,52(18):179-187.
- [4] 耿 新,马文恒,武 琼,等.新能源大规模并网环境下变电站孤岛技术研究[J]. 电力系统保护与控制,2024,52(3):161-171.  
GENG Xin, MA Wenheng, WU Qiong, et al.Islanding prevention technology for substations in the context of large - scale grid connection of new energy[J]. Power System Protection and Control,2024,52(3):161-171.
- [5] 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.
- [6] 李欣悦,李凤婷,尹纯亚,等. 直流双极闭锁故障下送端系统暂态过电压计算方法[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(1):1-8.  
LI Xinyue, LI Fengting, YIN Chunya, et al.Transient overvoltage calculation method of HVDC sending-end system under DC bipolar blocking[J]. Power System Protection and Control,2021,49(1):1-8.
- [7] 史训涛,孙 健,肖小兵,等.计及柔性负荷资源的分布式智能电网安全域建模[J]. 电力系统保护与控制,2025,53(20):69-82.  
SHI Xuntao, SUN Jian, XIAO Xiaobing, et al.Modeling of distributed smart grid security region considering flexible load resources[J]. Power System Protection and Control,2025,53(20):69-82.
- [8] 李从善,甄子凯,和 萍,等.风电与多端柔性直流输电系统自适应分频协调控制策略研究[J]. 电力科学与技术学报,2024,39(1):65-7392.  
LI Congshan, ZHEN Zikai, HE Ping, et al.Research on adaptive frequency division coordinated control strategy for wind power and multi terminal flexible HVDC transmission system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2024,39(1):65-7392.
- [9] 杨赛昭,向 往,文劲宇. 架空柔性直流电网线路故障保护综述[J]. 中国电机工程学报,2019,39(22):6600-6616.  
YANG Saizhao, XIANG Wang, WEN Jinyu.Review of DC fault protection methods for the MMC based DC grid[J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(22):6600-6616.
- [10] 王渝红,傅云涛,曾 琦,等. 柔性直流电网故障保护关键技术研究综述[J]. 高压技术,2019,45(8):2362-2374.

- WANG Yuhong, FU Yuntao, ZENG Qi, et al. Review on key techniques for fault protection of flexible DC grids[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8): 2362-2374.
- [11] 宋国兵, 陶然, 李斌, 等. 含大规模电力电子装备的电力系统故障分析与保护综述[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 2-12. SONG Guobing, TAO Ran, LI Bin, et al. Survey of fault analysis and protection for power system with large scale power electronic equipments[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 2-12.
- [12] 刘思源, 徐东旭, 梅念, 等. 直流侧故障对模块化多电平换流器的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 48-54. LIU Siyuan, XU Dongxu, MEI Nian, et al. Research on the effect of DC side fault on modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 48-54.
- [13] 康保林, 高亮, 屈子程. 基于 MMC 的直流电网故障分析和保护方案研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(13): 130-136. KANG Baolin, GAO Liang, QU Zicheng. Research on DC faults analysis and protection scheme of DC power grid based on MMC[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(13): 130-136.
- [14] 王渝红, 王媛, 曾琦, 等. 阻容式直流断路器及其在柔直系统中的应用[J]. 高电压技术, 2019, 45(1): 1-11. WANG Yuhong, WANG Yuan, ZENG Qi, et al. Resistor and capacitor based DC circuit breaker and its application in flexible DC system[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(1): 1-11.
- [15] 沙彦超, 蔡巍, 胡应宏, 等. 混合式高压直流断路器研究现状综述[J]. 高压电器, 2019, 55(9): 64-70. SHA Yanchao, CAI Wei, HU Yinghong, et al. Review of research status of hybrid HVDC circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(9): 64-70.
- [16] 李传玥, 梁俊, 王生. Interlink hybrid DC circuit breaker[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(11): 8677-8686.
- [17] MA Suliang, CHEN Mingxuan, WU Jianwen, et al. High-voltage circuit breaker fault diagnosis using a hybrid feature transformation approach based on random forest and stacked autoencoder[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(12): 9777-9788.
- [18] 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.
- [19] WANG Wenyuan, BARNES M, MARJANOVIC O, et al. Impact of DC breaker systems on multiterminal VSC - HVDC stability[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(2): 769-779.
- [20] 龚珺, 诸嘉慧, 方进, 等. 电阻型高温超导限流器暂态电阻特性分析[J]. 电工技术学报, 2018, 33(9): 2130-2138. GONG Jun, ZHU Jiahui, FANG Jin, et al. Analysis of transient resistance characteristics of resistive high-temperature superconducting current limiter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(9): 2130-2138.
- [21] 刘路昕, 张京业, 戴少涛, 等. 电阻型超导限流器研发现状及所面临的技术瓶颈[J]. 低温与超导, 2016, 44(7): 1-5. LIU Luxin, ZHANG Jingye, DAI Shaotao, et al. Present status of research and development and technical bottlenecks of resistive superconducting fault current limiter[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2016, 44(7): 1-5.
- [22] 涂春鸣, 姜飞, 郭成, 等. 多功能固态限流器的现状及展望[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 146-153. TU Chunming, JIANG Fei, GUO Cheng, et al. Present state and perspectives of multi-function solid-state fault current limiter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 146-153.
- [23] 官二勇, 董新洲, 冯腾. 一种固态直流限流器拓扑结构[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(4): 978-985. GUAN Eryong, DONG Xinzhou, FENG Teng. A solid DC current limiter topology[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(4): 978-985.
- [24] CHEN Lei, TANG Yuejin, LI Zhi, et al. Current limiting characteristics of a novel flux-coupling type superconducting fault current limiter[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2010, 20(3): 1143-1146.
- [25] 李健涛, 郭彦勋, 李海峰, 等. 一种适用于直流电网的阻容型混合式限流器[J]. 南方电网技术, 2018, 12(4): 16-23. LI Jiantao, GUO Yanxun, LI Haifeng, et al. A resistive and capacitive hybrid current limiter for DC power grid[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(4): 16-23.
- [26] 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.
- [27] 赵西贝, 许建中, 苑津莎, 等. 一种新型电容换相混合式直流限流器[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 6915-6923. ZHAO Xibei, XU Jianzhong, YUAN Jinsha, et al. A novel capacitor commutated hybrid DC fault current limiter[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 6915-6923.
- [28] LEWIS P T, GRAINGER B M, AL HASSAN H A, et al. Fault section identification protection algorithm for modular multilevel converter - based high voltage DC with a hybrid transmission corridor[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(9): 5652-5662.
- [29] 王姗姗, 周孝信, 汤广福, 等. 模块化多电平换流器 HVDC 直流双极短路子模块过电流分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1): 1-7. WANG Shanshan, ZHOU Xiaoxin, TANG Guangfu, et al. Analysis of submodule overcurrent caused by DC pole-to-pole fault in modular multilevel converter HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1): 1-7.
- 李鑫(1997—), 男, 硕士, 研究方向为柔性直流开断技术(E-mail: 1169630815@qq.com)。
- 陈权(1975—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力电子装置及其可靠性(通信作者)(E-mail: eechquan@ahu.edu.cn)。