

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.12.015

一种新型混合型超导限流器的设计与实验研究

陆利强¹, 庄劲武¹, 柯其琛^{1,2}, 李思光¹, 岳丹阳¹

(1. 海军工程大学电气工程学院, 武汉 430033; 2. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049)

摘要: 为解决传统电阻型超导限流器因超导组件参与常态通流而产生的超导带材用量过多及电流引线漏热功率过大等问题,提出了一种适用于中压船舶直流电力系统短路故障保护的新型混合型超导限流器拓扑结构。对其基于IGBT、高速真空开关的联合换流过程进行了试验研究与理论计算,得出了电容、电感、电阻等参数对换流过程的影响规律;采用盘式无感绕制的方式制作了超导带材盘,组成的高温超导组件电感值仅2.9 μH ;介绍了限流器用高速真空开关的触头运动特性;最后对限流器样机进行了试验,样机成功将预期峰值为57.6 kA的短路电流限流至24 kA以内,完成了在短路电流上升率为34 A/ μs 条件下,7.7 kA电流的换流,换流时间仅为61 μs ,电容电压最大值为1 170 V,并实现了高速真空开关无弧分断。

关键词: 混合型超导限流器; 中压直流; 快速换流; 高速真空开关; 无弧分断

Design and Experimental Research on a New Type of Hybrid Superconducting Current Limiter

LU Liqiang¹, ZHUANG Jinwu¹, KE Qichen^{1,2}, LI Siguang¹, YUE Danyang¹

(1. School of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to solve the problems of the excessive amount of superconducting tape and the excessive heat leakage power of the current lead due to the superconducting component participating in the normal current flow of the traditional resistive superconducting current limiter, the topological structure of a new type of hybrid superconducting current limiter which is suitable short circuit protection of DC power supply suitable for medium voltage ships is proposed. The joint commutation process based on IGBT and high-speed vacuum switch is experimentally researched and theoretically calculated, and the influence of capacitance, inductance, resistance and other parameters on the commutation process is obtained; The inductance of the high-temperature superconducting assembly, which is composed of superconducting tape discs which is made by the disc non-inductive winding, is only 2.6 μH ; The contact movement characteristics of the high-speed vacuum switch for the current limiter are introduced; Finally, the prototype of the current limiter is tested, and the prototype successfully limits the short circuit current with the prospective peaks of 57.6 kA within 24 kA. The commutation of current at 7.7 kA is completed under the condition of the short-circuit current rise rate at 34 A/ μs , the commutation time is only 61 μs , and the maximum capacitor voltage is 1 170 V. The arc-free breaking of the high-speed vacuum switch is achieved.

Key words: hybrid superconducting fault current limiter; medium voltage DC; fast commutation; high speed vacuum switch; breaking without arc

0 引言

船舶综合电力系统被誉为船舶动力的第三次革命,它将船舶电力系统和推进系统合二为一,实现了发电、配电与电力推进用电及其他设备的用电的统一调度和集中控制,使得船舶电力系统成为了船舶的主动力系统,其系统容量急剧上升。中压直流系统由于对原动机的调速性能要求低,发电机组易于并联,功率密度高,且系统生命力强,成为了船舶电力系统网络的首选^[1-3]。大容量船舶直流电力系统,具有线路阻抗小,时间常数小的特点,其在发生短路故障时,短路电流的初始上升率可以达到 $20\sim 30\text{ A}/\mu\text{s}$,在数ms的时间内短路电流便可上升至 100 kA ^[4],对直流断路器的分断性能提出了很高的要求^[5],加之船舶环境对电气设备的体积有着严格的约束,这将进一步加剧直流断路器的研制难度。

为了减轻直流断路器的负担,给系统装设故障限流器成为了一种有效的技术措施^[6-11],其目的就是在系统发生短路故障时,将原本会上升至高峰值的短路电流限制在较低水平。超导限流器由于具有理想限流器的众多特点,成为了限流器的首选。电阻型超导限流器由于具有适用范围广,限流能力强的优点,为学者广泛研究。文[12-14]表明为有效抑制短路电流且保证带材不因过流而损坏,超导限流器中的超导组件将需要由大量超导带材组成,在中压直流电网中,这将导致电阻型超导限流器的成本巨大。文[15-17]针对传统电阻型超导限流器因超导组件参与常态通流而导致的电流引线漏热功率过大、制冷设备体积过大的问题,提出了一种混合型超导限流器方案,采用了强迫换流的方式,实现了短路故障电流向超导组件的转移,使得超导组件仅参与故障限流,解决了引线漏热功率过大的问题。但由于换流过程中真空触头燃弧,对触头真空介质造成了污染,随着短路电流的继续上升,高速真空开关两端电压将迅速上升,真空触头很可能发生重击穿,并导致限流的失败。

为解决上述问题,文中提出了一种新型中压直流混合型超导限流器方案,不仅能减少超导带材的用量,还可实现高速真空开关的无弧分断,为真空触头承压创造了有利环境。文中对混合型超导限流器的换流过程进行了分析与研究,采用了盘式无感绕制的方式对第二代YBCO超导带材进行绕制,并完成了高温超导组件的组装;测量了高速真空开关的触头运动特性。最后对限流器样机进行了试验测试,试验表明:样机能够有效的限制短路电流,

并在高电流上升率的条件下,完成换流;高速真空开关的高承压性能为该拓扑应用于中高压直流系统故障保护提供了保障。

1 中压直流混合型超导限流器工作原理

文中所提出的混合型超导限流器的原理图见图1。其直接串联在系统回路中,与断路器配合工作。混合型超导限流器由短路电流检测装置(CDD)、主支路(main branch)、辅助换流支路(auxiliary commutation branch)和超导限流支路(superconducting current limiting branch)4部分组成,主支路由绝缘栅双极型晶体管(IGBT)与高速真空开关(VI)串联组成,辅助换流支路由快恢二极管D、电容C及放电电阻R组成,超导限流支路由高温超导组件(HTS)并联限流电阻 R_s ,再与晶闸管串联而成。

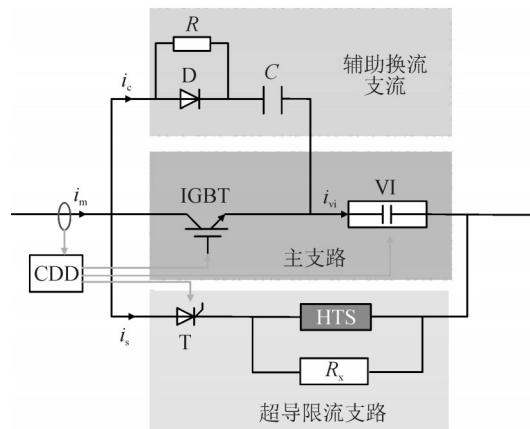


图1 混合型超导限流器原理图

Fig. 1 Schematic diagram of hybrid superconducting fault current limiter

当系统正常运行时,主回路电流 i_m 经IGBT与高速真空开关VI上流通。当系统发生短路故障时,CDD检测到短路电流后,将同时发出三路控制信号,分别触发IGBT、VI分断、晶闸管T导通。IGBT关断后在辅助换流支路的作用下,短路电流由VI支路迅速转换至超导限流支路,当超导限流支路电流 i_s 上升至与主回路电流 i_m 相等时,VI电流 i_{vi} 下降至0,此时经机械延时后,VI触头将形成开距,实现无弧分断。短路电流此后将完全经超导限流支路流通,随即高温超导组件在短路电流的作用下迅速失超,呈现高阻态,在与限流电阻 R_s 的共同作用下,短路电流在 $2\sim 3\text{ ms}$ 内即可被限制在较低水平,断路器的分断负担将极大减轻。在故障排除后,重新导通IGBT及高速真空开关,辅助换流支路中电容能量由放电电阻R释放,高温超导组件经短暂的恢复时间后重新进入超导态,限流器即可进行下一轮的故障限流。

与传统电阻型限流器相比,该型限流器实现了高温超导组件不参与常态通流,仅在发生短路故障时,短时承担部分短路电流的流通,不仅解决了传统电阻型超导限流器引线漏热功率过大的问题,且有利于超导带材用量的减少及限流器体积的减小。此外,该限流器方案利用VI的高耐压性能,能将IGBT电压控制在较低水平,使得单只IGBT模块即可满足承压要求,这可减少IGBT的用量,进而减小限流器的通态损耗;VI的无弧分断为真空触头承压创造良好的绝缘介质环境。

2 基于IGBT关断的换流效果分析

2.1 基于IGBT关断的换流试验

为分析混合型超导限流器的换流过程,搭建了实验平台,其电路见图2。图2中,放电电路由放电电容 C_0 、电感 L_0 、线路电阻 R_0 、晶闸管 T_0 及续流二极管 D_0 组成。主体换流电路由IGBT、二极管 D 、电容 C 、尖峰电容 C_j 、线路电感 L_1 、晶闸管 T 、电阻 R_s 、线路电感 L_s 组成。其参数见表1。尖峰电容 C_j 的作用是抑制IGBT在关断瞬间产生的过电压尖峰,IGBT使用的是单只型号为FZ3600R17HP4_B2的IGBT模块,其额定电压为1 700 V,额定电流3 600 A。

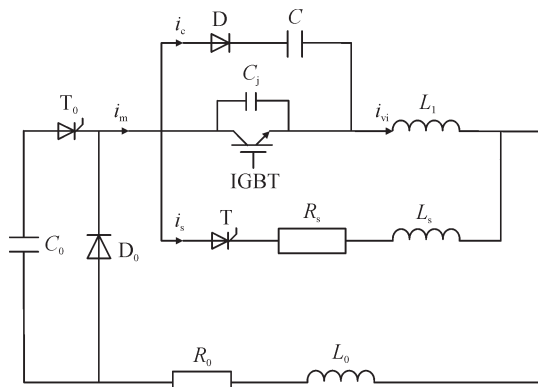


图2 IGBT关断换流试验原理图

Fig. 2 Schematic diagram of IGBT turn-off commutation experiment

表1 换流试验参数

Table 1 Parameters of commutation experiment

参数	数值
放电电容 C_0/mF	30
电感 $L_0/\mu\text{H}$	120
线路电阻 $R_0/\text{m}\Omega$	25
尖峰电容 $C_j/\mu\text{F}$	2
电容 $C/\mu\text{F}$	205
电感 $L_1/\mu\text{H}$	0.5
电阻 $R/\text{m}\Omega$	110
电感 $L_s/\mu\text{H}$	5

试验开始前通过外部充电机将放电回路的电容 C_0 充至试验电压 U_0 。实验控制策略如下:在0时刻导通晶闸管 T_0 及IGBT,在300 μs 时刻给IGBT发送关断信号,同时给晶闸管 T 发送导通信号。实验过程中通过示波器记录主回路电流 i_m 、辅助换流支路电流 i_e 、限流支路电流 i_s 、辅助换流支路电容电压 u_c 及IGBT电压 u_{igbt} 。

电容 C_0 预充电压 U_0 为1 000 V的实验波形见图3。由实验波形可知,在0时刻,晶闸管 T_0 及IGBT导通,主回路电流 i_m 开始上升;300 μs 时刻,IGBT开始关断,晶闸管 T 导通。关断瞬间,IGBT的尖峰电压为694 V,辅助换流支路电流 i_e 出现尖峰脉冲后不断下降,限流支路电流 i_s 不断上升,在378 μs 时刻与主回路电流相等,电流至此完成了由IGBT支路向限流支路的转移。电容电压 u_c 在换流过程中不断上升,在换流完成时上升至最大值约500 V。值得注意的是,电流 i_s 在上升至与主回路电流相等后出现明显的振荡现象,这将导致原设计中真空开关支路电流 i_{vi} 出现振荡现象,无法实现高速真空开关的无弧分断。分析认为是尖峰电容在换流过程中与超导限流支路形成了振荡回路,导致振荡电流的产生。观察到同样是并联在IGBT两端的电容 C 电流 i_c 在下降至0后,只产生了数值极小,时间极短的反向电流,随后基本保持为0,未出现振荡。分析认为是辅助换流支路中存在的二极管使得电流 i_e 在过0后无法形成振荡,试验中产生的微小的反向电流与二极管的反向恢复时间有关,为减小反向电流的出现,建议采用快恢二极管。

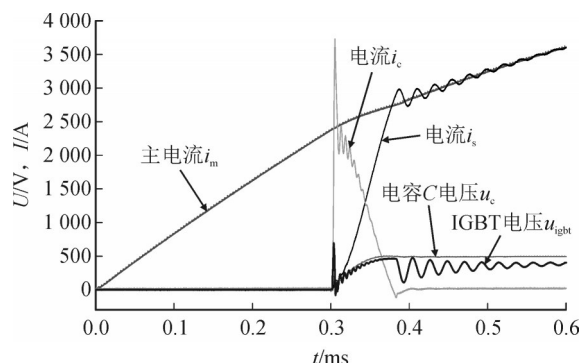


图3 换流试验波形1

Fig. 3 Waveform of commutation experiment 1

为解决换流过程中产生的振荡问题,给尖峰电容加串了一个二极管,并将电容 C_0 预充电至1 000 V,再次进行了试验,试验波形见图4。可以看出,在尖峰电容串联二极管后,换流过程产生的振荡现象消失,电流 i_s 在上升至与主回路电流后,经历了短时的上升后,便与主回路电流保持相等。由于二极管的

存在,尖峰电容电流在IGBT关断后迅速下降至0,电流 i_{vi} 与电流 i_c 仅在IGBT关断瞬间有微小差别,在换流过程中可认为电流 i_{vi} 与电流 i_c 基本相等。

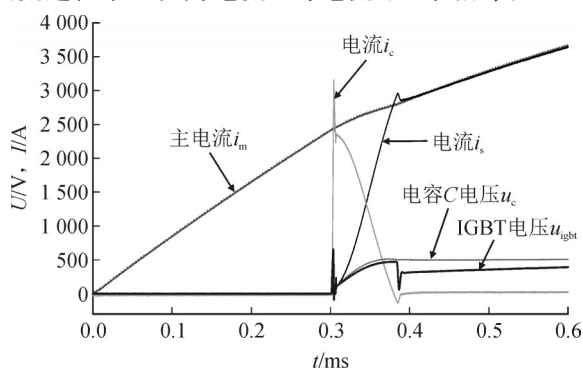


图4 换流试验波形2

Fig. 4 Waveform of commutation experiment 2

2.2 基于IGBT关断的换流过程分析

为分析电路参数对换流的影响,为电路设计参数提供依据,先对换流过程的电路进行分析,建立其数学模型,再基于数学模型得出电路参数对换流效果的影响规律。

2.2.1 换流过程数学模型的建立

由于IGBT关断时间极短,可认为换流过程开始时,IGBT即完成关断。忽略二极管、晶闸管导通压降,考虑线路电感;则IGBT关断后的换流过程等效电路图见图5。

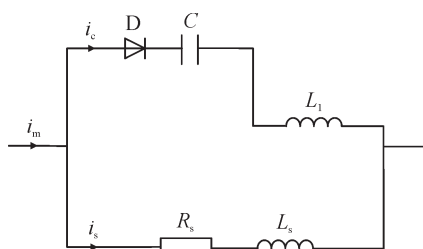


图5 换流过程等效电路图

Fig. 5 Equivalent circuit diagram of commutation process

图5中: L_1 为辅助换流支路及VI支路线路总电感; L_s 为限流支路线路总电感;二极管D为理想二极管,仅起电流定向作用。假设在换流过程中主回路电流上升率 di/dt 为一定值 K ,并将IGBT完成关断的时刻视为0时刻,认为电容电流 i_c 在下降至0时换流结束,可知换流过程满足式(1)电路方程

$$\begin{cases} i_m = i_{set} + Kt \\ i_m = i_s + i_c \\ i_c = C \frac{du_c}{dt} \\ u_c + L_1 \frac{di_c}{dt} = L_s \frac{di_s}{dt} + i_s R_s \end{cases} \quad (1)$$

由上述换流实验可知,电流 i_c 的初始值可认为是IGBT关断时的动作电流 i_{set} ,电容电压 u_c 的初始值为0。

根据式(1)及初始条件求解可得电流 i_c 及电压 u_c 的表达式为

$$\begin{cases} i_c = e^{-\alpha t} \sqrt{k_1^2 + k_2^2} \cos(w_d t - \varphi_1) + KCR_s \\ u_c = e^{-\alpha t} \sqrt{k_3^2 + k_4^2} \sin(w_d t - \varphi_2) + KR_s t - k_3 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{式(2)中: } k_1 &= i_{set} - KCR_s; k_2 = \frac{1}{w_d} \left[\frac{i_{set} R_s}{2L} + KC \left(\frac{L_s}{LC} - \frac{R_s}{2L} \right) \right]; k_3 = -i_{set} R_s - L_s K + KCR_s^2; k_4 = \frac{1}{w_d} \left(\frac{i_{set}}{C} - KR_s + \alpha k_3 \right); \\ \tan \varphi_1 &= \frac{k_2}{k_1}; \tan \varphi_2 = \frac{k_3}{k_4}; L = L_1 + L_s; \alpha = \frac{R_s}{2L}; \\ w_d &= \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R_s}{2L} \right)^2}. \end{aligned}$$

由于二极管D的存在,电流 i_c 在下降至0后将无法反向流通,此时电容电压将上升至最大值,设换流时间为 Δt ,电容电压 u_c 最大值为 U_{cmax} ,由式(2)可知 Δt 及 U_{cmax} 与电容值 C 、限流支路电阻 R_s 、初始关断电流 i_{set} 、电流上升率 K 、电感 L_1 、 L_s 等因素有关。

$$u_s = L_s \frac{di_s}{dt} + i_s R_s \quad (3)$$

限流支路电压 u_s 满足式(3),由图5可知,实验波形中 i_{set} 约为2400 A, K 约为4.5 A/ μ s,其余参数按表2取值,基于式(1)–(3)由MATLAB自编程序,可得换流过程的仿真波形见图6。

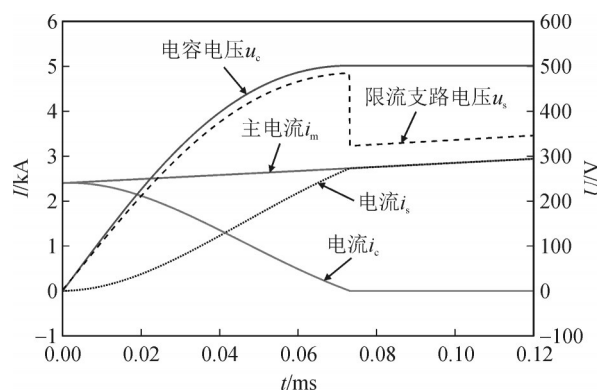


图6 仿真换流波形

Fig. 6 Simulated commutation waveform

由图6可知,当 $\Delta t=74 \mu$ s、 $U_{cmax}=502$ V时,与实验结果基本相同。此外,若不考虑二极管反向恢复的理想情况下,在电流 i_c 在下降至0后,限流支路电流 i_s 上升率下降至与主电流上升率相同,电压 u_s 明显下降,电容电压 u_c 明显高于限流支路电压 u_s ,由于二极管的存在,电容无法经限流支路放电,电容电压保持不变,电流 i_c 保持为0。但随着限流支路电流 i_s 上升,限流支路电压 u_s 将在某一时刻超过电容电压 u_c ,此时辅助换流支路将再次导通,其电流 i_c 将由0继续

上升。由此可知,电流 i_c 仅在换流完成后的一定时间段内保持为0,将这一时间段称为无弧分断的“窗口期”。通过合理设计换流时间,高速真空开关触头机构便可在“窗口期”实现无弧分闸。

2.2.2 电路相关参数对换流效果的影响

混合型限流器在正常工况下额定通流为6 kA,在发生短路故障时,考虑到故障检测需要一定时间,故取 i_{set} 为8 kA;实际船舶直流系统短路电流上升率较高,取 K 值为20 A/ μ s。

设定电路参数的基准值, L_l 为0.5 μ H、 L_n 为5 μ H、 R_s 为110 m Ω 、 C 为200 μ F。通过控制变量法分析相关参数对换流效果的影响。

辅助换流支路中的电容 C 的作用是在IGBT关断后能将电流快速转移至限流支路,并吸收线路电感上的能量,以降低IGBT器件两端的电压值,保证IGBT的可靠运行。以下采用了200、300 μ F两种电容值对换流过程进行计算,电流 i_c 及电容电压 u_c 的波形见图7。

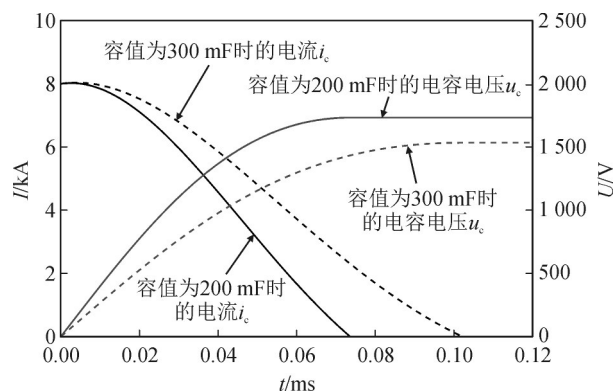


图7 不同电容值下的换流波形

Fig. 7 Commutation waveforms under different capacitance values

由图7中可以看出,随着电容容值的增大,换流时间 Δt 增大, U_{cmax} 减小。由此可以看出,在电容参数选取时,为了降低IGBT器件两端电压应选取较大的电容值,而这将带来换流时间的增大,导致高速真空开关无法实现无弧分断。因此,设计电容参数时需要同时考虑这两方面因素的影响。

电感是线路中不可忽视的一点,不论是超导带材、电阻,还是导线,都存在一定数值的电感。电感的存在阻碍着电流的变化,不利于换流时间的减小。由于电感 L_l 、 L_n 对换流效果的影响基本相同,所以只要研究其中一个即可得出相应规律。以下采用了3、5 μ H两种感值的 L_n 对换流过程进行计算,电

流 i_c 及电容电压 u_c 的波形见图8。

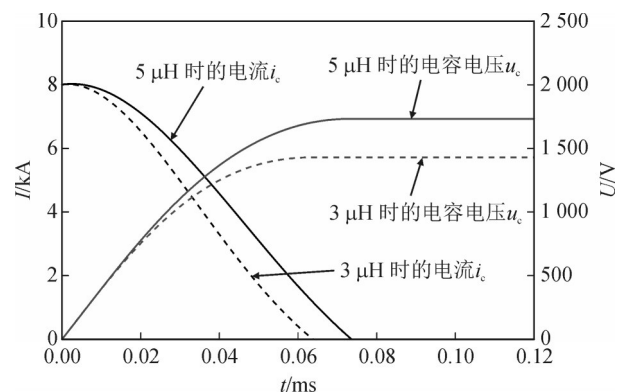


图8 不同电感值下的换流波形

Fig. 8 Commutation waveforms under different inductance values

由图8中可以看出,随着电感 L_n 感值的增大,换流时间 Δt 增大, U_{cmax} 增大。电感的增大,使得换流更加困难,换流时间延长,电容电压的最大值变大。所以在设计中应尽可能减小回路中的电感。

限流支路电阻 R_s 的作用是在换流完成后将短路电流限制在要求范围以下,电阻 R_s 数值越大,限流效果越好,但 R_s 数值的大小不仅对限流效果有影响,对换流效果同样影响很大。以下采用了50、110 m Ω 两种阻值对换流过程进行计算,电流 i_c 及电容电压 u_c 的波形见图9。

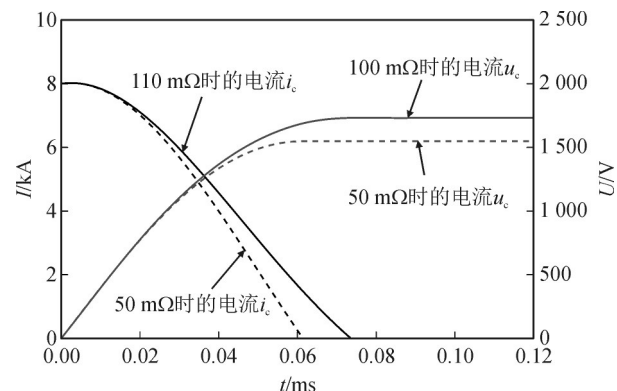


图9 不同电阻值下的换流波形

Fig. 9 Commutation waveforms under different resistance values

由图9中可以看出,随着电阻阻值的增大,换流时间 Δt 增大, U_{cmax} 增大。从减小 Δt 及 U_{cmax} 的角度考虑,希望换流过程中的电阻尽可能的小。从更好的限流效果的角度考虑,则希望限流阶段的电阻尽可能的大。为兼顾两方面的需求,采用限流电阻并联超导组件的方案,在换流阶段,由于超导带材处于超导态,超导组件电阻较小;换流完成后,随着流经超导组件电流的上升,超导组件失超,电阻迅速增大。该方案利用超导带材的特性,实现了限流支路电阻由小至大的转变,在保证换流效果的同时,使

得限流效果也能符合设计要求。

3 PSCAD 仿真分析

3.1 仿真模型

基于PSCAD仿真软件,搭建了混合型超导限流器拓扑仿真电路见图10。

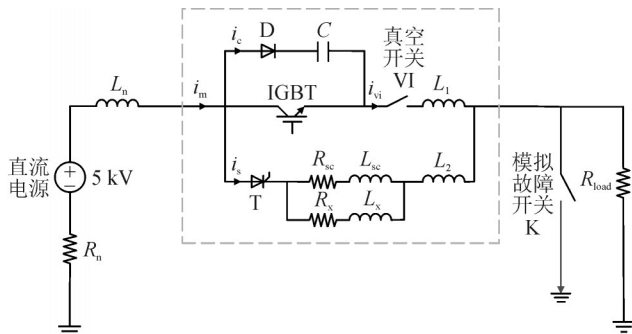


图10 PSCAD 仿真模型

Fig. 10 PSCAD simulation model

图10主要由4个模块组成:

1)电源模块。利用一个5 kV直流电源和阻性负载 R_{load} ,简单模拟5 kV/6 kA的直流供电系统,系统内阻 R_n 为50 m Ω 。

2)电抗器模块。系统中电抗器 L_m 取值为145 μ H,以产生特定上升率的短路电流。

3)混合超导限流器模块。IGBT参数设置参照英飞凌公司型号为FZ3600R17HP4_B2的IGBT模块;晶闸管及二极管为理想器件,真空开关VI为理想开关,设置其机械延时为100 μ s, L_1 为辅助换流支路及VI支路线路总电感取值为试验拟合值0.26 μ H;高温超导组件采用自定义电阻模块串联电感等效替代, L_{sc} 取值为超导组件测量值2.9 μ H;电阻自定义方法参见文[18],限流电阻采用定值电阻串电感的等效替代,电阻 R_c 取值为实际测量值175 m Ω ,电感 L_c 取值为3 μ H; L_2 为连接导线的分布电感,取值为1.72 μ H。

4)模拟短路故障模块。系统经开关S短路接地,设置故障在2 ms时刻出现

设置IGBT及晶闸管T在短路电流上升至8 kA时刻动作,高速真空开关延时100 μ s后打开,仿真时长为30 ms,步长为0.4 μ s。

3.2 仿真分析

在高温超导组件设置为4根50 m临界电流为500 A的YBCO超导带材并联组成,辅助换流支路电容容值取为250 μ F时,换流过程仿真波形见图11。

由仿真结果可知,短路电流在2.066 ms时刻上升至8 kA,短路电流上升率约30 A/ μ s,在超导组件的作用下,短路电流转移至限流支路仅需60 μ s,电

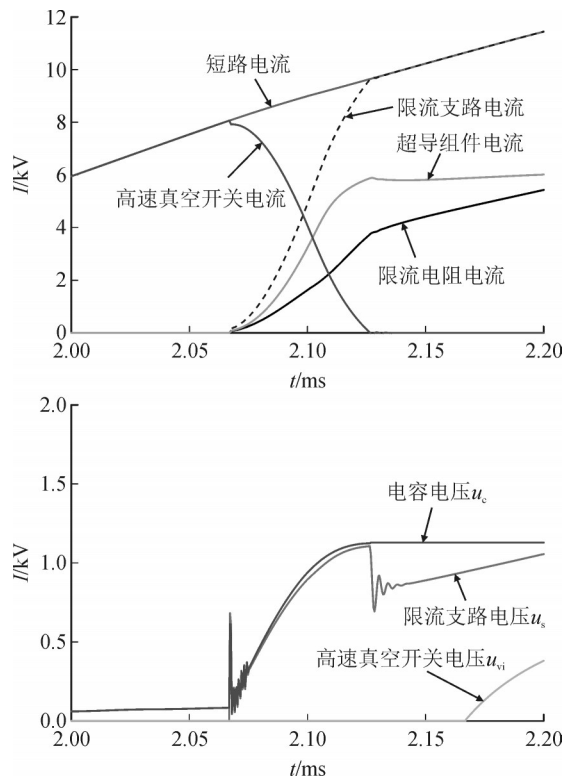


图11 仿真波形

Fig. 11 Simulation waveform

容电压最大值为1 128 V,无弧分断的“窗口期”时长约96 μ s,高速真空开关在2.166 ms时刻打开,实现无弧分断,并开始承压。

此外,由仿真计算出限流支路电压与限流支路电流比值,并认为该值为限流支路等效电阻阻值,该值前2.5 ms的变化规律见图12。由于初期收到电感压降的影响,波形中出现跳变,忽略电感压降等影响,其实际变化规律应如虚线。还可以看出,因超导组件的存在,使得限流支路等效电阻在换流阶段电阻处于较低水平,且换流速度较快,电容电压最大值较低,从而IGBT两端电压可以控制在1 200 V以内,单只IGBT即可满足耐压要求,避免了IGBT因承压不足而需串联应用,将成倍减小IGBT的通态损耗。若无超导组件,在限流电阻为175 m Ω 的条件下,由仿真可知,换流将会失败,高速真空开关无法关断,电容电压将会不断上升,直至IGBT过压击穿,限流失败。

在辅助换流支路电容容值取50 μ F,其余电路参数均不改变时,仿真波形见图13。

由仿真结果可知,电容容值为50 μ F时,短路电流转移至限流支路仅需24 μ s,电容电压最大值为2 205 V,无弧分断的“窗口期”时长约477 μ s,高速真空开关在2.166 ms时刻打开,实现了无弧分断,并开始承压。

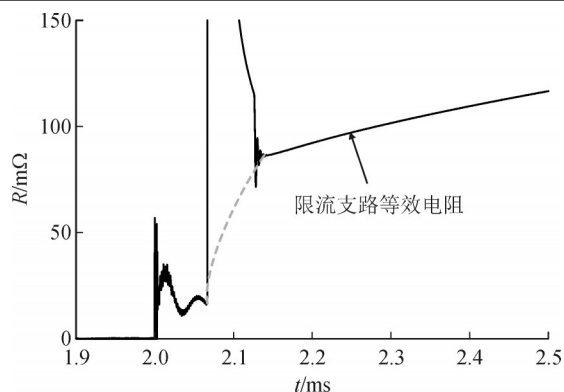
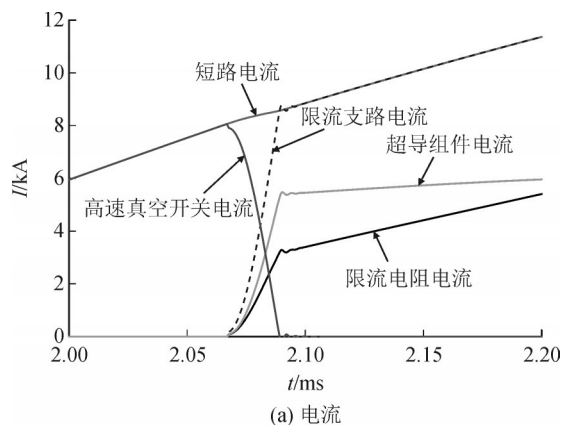
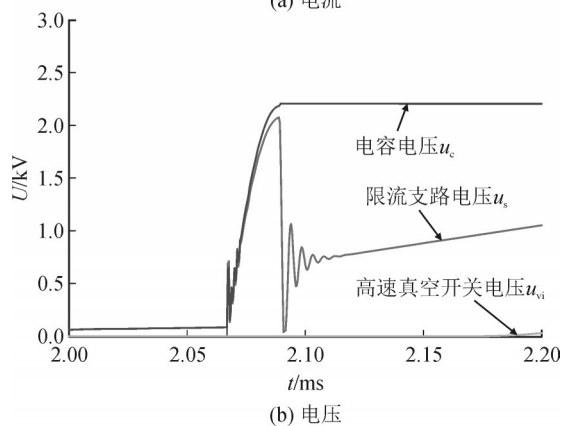


图12 仿真波形

Fig. 12 Simulation waveform



(a) 电流



(b) 电压

图13 仿真波形

Fig. 13 Simulation waveform

对比不同电容容值下的换流波形,可知电容容值的减小,有利于换流速度的减小及无弧分断的“窗口期”时长的延长,对真空开关触头的固有机机械延时降低了要求,使得机械延时更长真空开关也能实现无弧分断。但容值的减小,同时也会导致电容电压最大值的增大,IGBT承压要求将会更高,由于选用的IGBT模块单只耐压仅1 700 V,所以IGBT需要进行串联使用,这将使得通态损耗成倍增加。

4 高温超导组件(HTS)

限流器所使用的超导带材为某超导公司生产的YBCO带材,是第二代高温超导带材。为避免长

距离带材带来过大的线路电感,超导带材采用无感的方式进行绕制。文中所采用绕制方式与2014年中科院电工所与中国电力科学研究院共同提出的新型盘式无感线圈基本一致^[19]。带材两端通过铜排压接后连接到回路中。

高温超导组件HTS采用8个25 m带材盘(4并50 m)连接形成。其结构及实物图见图14。25 m长的超导带材绕制形成的带材盘,其直径为400 mm,高35 mm。试验测得高温超导组件的电感为2.9 μH。

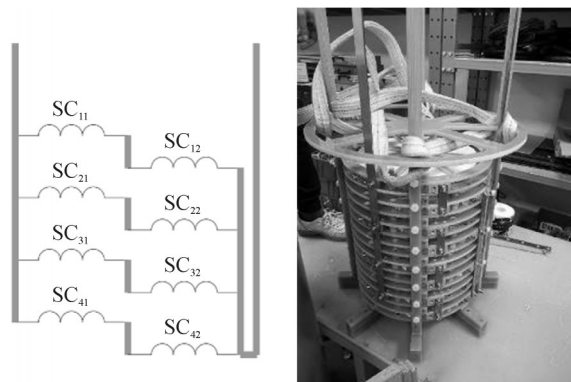


图14 高温超导组件结构及实物图

Fig. 14 Structure and physical diagram of high-temperature superconducting components

5 高速真空开关

文中所采用的高速真空开关(VI)是基于涡流电磁斥力原理的电磁斥力开关^[20-22]。高速真空开关的结构见图15。其主要由斥力盘、斥力线圈、真空灭弧室、动静触头组成。脉冲驱动回路电路见图16,其由放电电容 C_i 、晶闸管 T_i 、斥力线圈及续流二极管 D_i 组成。

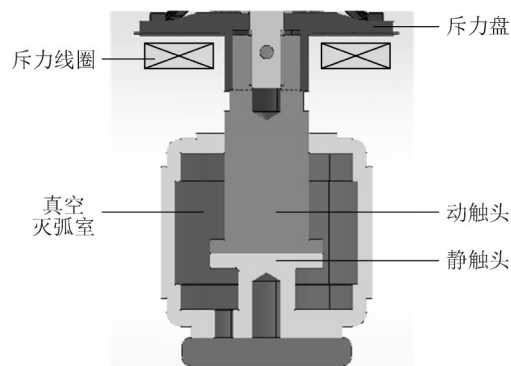


图15 高速真空开关结构示意图

Fig. 15 Schematic diagram of high-speed vacuum switch structure

在VI动作前,电容 C_i 预充电至工作电压。其工作原理为:VI正常工作时,电流经动静触头流通;当限流器检测到系统发生故障时,将给晶闸管 T_i 发送导通信号,电容 C_i 开始放电,斥力线圈回路将产生

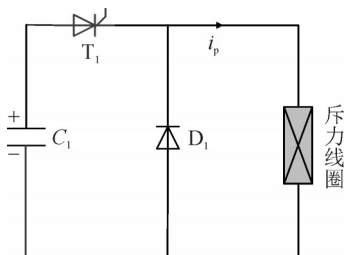


图 16 脉冲驱动回路原理图

Fig. 16 Principle diagram of pulse drive circuit

脉冲电流,随之产生脉冲磁场,在脉冲磁场的作用下,位于斥力线圈上方的金属盘将形成感应涡流,两者随之产生巨大的电磁斥力,推动斥力盘高速运动,从而带动动触头运动,与静触头发生分离,使得 VI 实现快速分断。从晶闸管 T_1 接收到导通信号至动静触头形成开距存在一定的机械延时,并将这段时间称为真空开关的刚分时间。试验测得,在放电电容预充电压为 1 500 V 时,真空开关的刚分时间约为 100 μs ,触头的前 2 ms 平均位移速度为 1.75 m/s,稳定开距约 2.6 mm。

6 样机试验

样机试验利用电容放电电路来模拟短路故障,见图 17。图 17 放电电路由放电电容 C_0 、电感 L_0 、线路电阻 R_0 、开关 K_0 及续流二极管 D_0 组成,其参数见表 2。超导限流器样机中 IGBT 由 3 只 IGBT 模块并联而成,其额定电压为 1 700 V,额定电流 3 600 A。电容 C 为 250 μF ,为减小其线路电感,采用 5 个 50 μF 的电容并联而成,尖峰电容 C_j 为 2 μF 。二极管 D 、 D_j 均为普通二极管,晶闸管 T 由两个型号为 H100KPR 的普通晶闸管串联组成,限流电阻阻值为 175 $\text{m}\Omega$,其感值约为 3 μH , HTS 及 VI 在前文已介绍,试验现场见图 18。

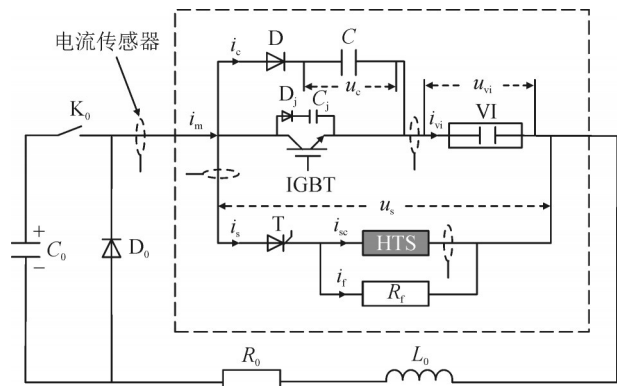


图 17 样机试验电路

Fig. 17 Experimental circuit of the prototype

试验开始前给电容 C_0 预充电至 5 kV,随后控制开关 K_0 闭合使得电容 C_0 放电以产生短路电流。试验时

表 2 试验电路参数表

Table 2 Experimental circuit parameter table

参数	数值
放电电容 C_0/mF	30
电感 $L_0/\mu\text{H}$	150
线路电阻 $R_0/\text{m}\Omega$	20

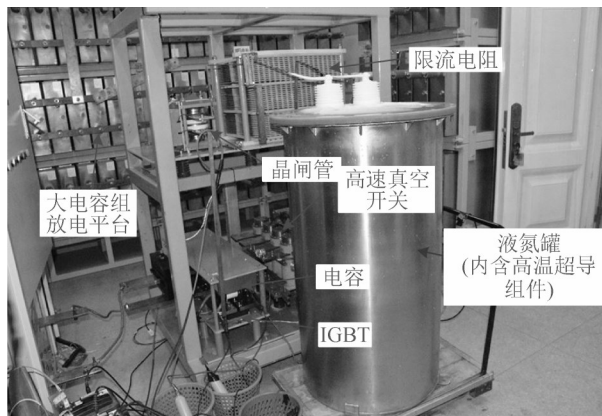


图 18 样机试验现场图

Fig. 18 Experimental site diagram of the prototype

测量主回路电流 i_m 、高速真空开关支路电流 i_{vi} 、超导限流支路电流 i_s 、高温超导组件电流 i_{sc} 、超导限流器中电容电压 u_c 、限流支路电压 u_s 及高速真空开关电压 u_{vi} 。

试验波形见图 19。图 19 中,电阻电流 i_r 由 i_s 与 i_{sc} 相减得出。混合型超导限流将预期峰值为 57.6 kA 的短路电流限制到 24 kA 以内,限流效果明显。在 225 μs 时刻,换流过程开始,主回路电流为 7 650 A,短路电流上升率 di/dt 为 34 A/ μs ,经 61 μs 后,超导限流支路电流与主回路电流相等,换流结束。超导限流支路电流的平均 di/dt 为 152.5 A/ μs ;换流结束时,电容电压上升至最大值 1 170 V。换流过程中,限流支路电流绝大部分流经高温超导组件,这是因为高温超导组件在此阶段电阻较小,且正是由于高温超导组件在换流阶段的小电阻特性才使得换流过程如此迅速、电容最大电压值数值较小;换流结束后,高温超导组件在高电流条件下迅速失超,电阻不断上升,使得短路电流绝大部分经限流电阻流通,这将大大减小对超导组件的过电流冲击能力的要求^[23-24],进一步提高设备运行的稳定性与可靠性。

此外,在换流结束后,窗口期时长约 150 μs ,在此期间,超导限流支路电压明显低于电容电压,VI 支路电流 i_{vi} 保持为 0,VI 可实现无弧分断,与先前理论分析一致。在 360 μs 时刻 VI 完成刚分,触头无弧打开,开始承压。随着短路电流的持续上升,超导限流支路电压不断上升,高速真空开关电压随之不断上升,在 2 ms 达到最大值 2.14 kV。

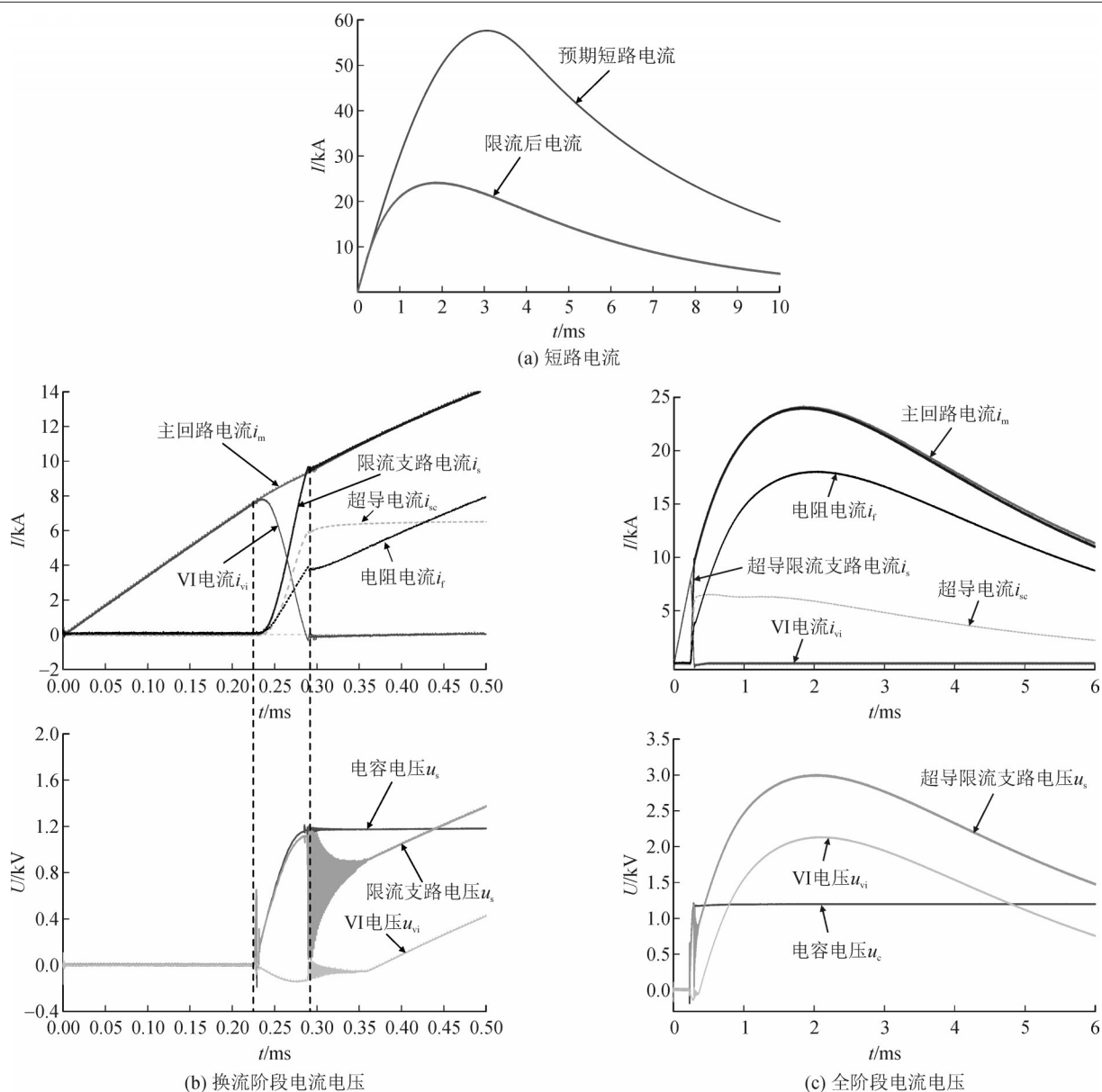


图19 样机试验波形

Fig. 19 Waveforms of prototype experiment

7 结论

文中提出了一种新型混合型超导限流器拓扑结构,为中压船舶直流电力系统短路故障保护提供了一种可靠的解决方案。在限流器换流规律的基础上,对超导限流器的换流过程进行了试验研究与理论计算,得出了限流器电路参数的设计原则。基于实际工程需求,设计了超导带材盘,组成了高温超导组件;介绍了使用的高速真空开关;最后对设计的限流器样机进行了试验测试,验证了混合型超导限流器的可行性。从研究结果可以得出以下结论:

1)该混合型超导限流器采用额定通流与故障限流分开处理的方法,解决了传统电阻型超导限流器

因超导组件参与常态通流而导致的电流引线漏热功率过大的问题。辅助换流支路与IGBT、高速真空开关及限流支路的配合使用,使得高速真空开关实现了无弧分断,为高速真空开关触头的承压创造了有利的环境;超导组件与限流电阻的配合使用,即保证了换流阶段中超导组件电阻小,换流速度快,也实现了在限流阶段超导组件失超后呈现高阻态的有效限流。

2)混合型超导限流器中的电容等参数对换流过程有着重要的影响,必须合理的进行选择与设计才能确保换流快速性的同时,使得电容最大电压值能够控制在较低水平。

3)试验表明样机成功将短路电流由预期的峰值为57.6 kA限流至24 kA以内,实现了在电流上升率

为 34 A/ μ s 条件下, 7.7 kA 电流的换流, 换流时间仅为 61 μ s、电容电压最大值为 1 170 V, 高速真空开关也实现了无弧分断。

参考文献:

- [1] 马伟明, 胡安, 袁立军. 十二相同步发电机整流系统直流侧突然短路的研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 18(3): 31-36.
MA Weiming, HU An, YUAN Lijun. Study on sudden short circuit on DC side of 12-phase synchronous generator rectification system[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 18(3): 31-36.
- [2] 付立军, 刘鲁锋, 王刚, 等. 我国舰船中压直流综合电力系统研究进展[J]. 中国舰船研究, 2016, 11(1): 72-79.
FU Lijun, LIU Lufeng, WANG Gang, et al. Research progress of my country's ship medium-voltage DC integrated power system[J]. China Ship Research, 2016, 11(1): 72-79.
- [3] 陈虹. 基于直流配电系统的船舶综合电力系统[J]. 舰船科学技术, 2005, 27(s1): 31-37.
CHEN Hong. Integrated ship power system based on DC power distribution system[J]. Ship Science and Technology, 2005, 27(s1): 31-37.
- [4] 付立军, 陈波, 叶志浩. 直流网状网络短路电流计算[J]. 高电压技术, 2008, 34(8): 1731-1736.
FU Lijun, CHEN Bo, YE Zhihao. Calculation of short circuit current in DC mesh network[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(8): 1731-1736.
- [5] 刘路辉, 叶志浩, 付立军, 等. 快速直流断路器研究现状与展望[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(4): 966-978.
LIU Luhui, YE Zhihao, FU Lijun, et al. Research status and prospects of fast DC circuit breakers[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(4): 966-978.
- [6] 叶林, 林良真. 超导故障限流器在电力系统中的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(7): 2-5.
YE Lin, LIN Liangzhen. Research on application of superconducting fault current limiter in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(7): 2-5.
- [7] 周雪松, 向龙瑞, 马幼捷, 等. 故障限流装置的发展和应用[J]. 电工技术学报, 2004, 19(11): 1-7.
ZHOU Xuesong, XIANG Longrui, MA Youjie, et al. Development and application of fault current-limiting devices[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(11): 1-7.
- [8] 郑健超. 故障电流限制器发展现状与应用前景[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5140-5148.
ZHENG Jianchao. Development status and application prospects of fault current limiters[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5140-5148.
- [9] WU Yifei, RONG Mingzhe, WU Yi, et al. Damping HVDC circuit breaker with current commutation and limiting integrated[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(12): 10433-10441.
- [10] 王建华, 项彬, 杨骥, 等. 超导限流直流开断技术研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(20): 4196-4207.
WANG Jianhua, XIANG Bin, YANG Xing, et al. Research on superconducting current limiting DC breaking technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2019, 34(20): 4196-4207.
- [11] 胡竞竞, 徐习东, 裘鹏, 等. 直流配电系统保护技术研究综述[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 844-851.
HU Jingjing, XU Xidong, QIU Peng, et al. Overview of research on protection technology of DC distribution system[J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 844-851.
- [12] 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. The current research and development status of resistive superconducting current limiter and the technical bottleneck it faces[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2016, 44(7): 1-5.
- [13] 庄劲武, 张谢天. 基于直流混合型超导限流器的超导带材失超和耐受性能研究[J]. 海军工程大学学报, 2019, 31(1): 1-4.
ZHUANG Jinwu, ZHANG Xietian. Study on quench and endurance performance of superconducting tape based on DC hybrid superconducting current limiter[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2019, 31(1): 1-4.
- [14] MAJKA M, KOZAK J, KOZAK S. HTS Tapes selection for superconducting current limiters[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2017, 27(4): 1-5.
- [15] 张谢天, 庄劲武, 高海林, 等. 直流混合型超导限流器强迫换流方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 63-67.
ZHANG Xietian, ZHUANG Jinwu, GAO Hailin, et al. Research on forced commutation method of DC hybrid superconducting current limiter[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 63-67.
- [16] 赵天翔, 张谢天, 付雪, 等. 直流混合型超导限流器电流引线设计及漏热研究[J]. 舰船科学技术, 2018, 40(10): 122-125.
ZHAO Tianxiang, ZHANG Xietian, FU Xue, et al. Current lead design and heat leakage study of DC hybrid superconducting current limiter[J]. Ship Science and Technology, 2018, 40(10): 122-125.

- [17] 岳丹阳, 庄劲武, 武 瑾, 等. 高温超导限流器限流单元电磁力分析[J]. 电器与能效管理技术, 2022(1): 67-72.
YUE Danyang, ZHUANG Jinwu, WU Jin, et al. Electromagnetic force analysis on current limiting unit of high temperature superconducting current limiter[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2022(1): 67-72.
- [18] 陆利强, 庄劲武, 柯其琛, 等. 基于直流超导限流器的超导带材实验研究[J]. 高压电器, 2024, 60(8): 193-200.
LU Liqiang, ZHUANG Jinwu, KE Qichen, et al. Experimental study of superconducting tape based on direct current superconducting current limiter[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(8): 193-200.
- [19] 龚 珺. 混合型高温故障超导限流器无感限流单元设计研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
GONG Jun. Design of non-inductive current limiting unit of hybrid high temperature fault superconducting current limiter[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [20] 江壮贤, 庄劲武, 王 晨, 等. 基于电磁斥力原理的高速触头机构仿真分析与设计[J]. 电工技术学报, 2011, 26(8): 172-177.
JIANG Zhuangxian, ZHUANG Jinwu, WANG Chen, et al. Simulation analysis and design of high-speed contact mechanism based on the principle of electromagnetic repulsion[J]. Transactions of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2011, 26(8): 172-177.
- [21] 袁发庭, 吕 凯, 刘健彝, 等. 基于电磁—热—结构多物理场耦合的铁心电抗器线圈结构优化方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(24): 6431-6441.
YUAN Fating, LYU Kai, LIU Jianben, et al. Coil structures optimization method of iron core reactor based on electromagnetic-thermal-structure multi-physical field coupling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(24): 6431-6441.
- [22] 王子建, 何俊佳, 尹小根, 等. 基于电磁斥力机构的10 kV快速真空开关[J]. 电工技术学报, 2009, 24(11): 68-75.
WANG Zijian, HE Junjia, YIN Xiaogen, et al. 10 kV fast vacuum switch based on electromagnetic repulsion mechanism[J]. Journal of Electrotechnical Engineering, 2009, 24(11): 68-75.
- [23] YE Lin, JUENGST K P. Modeling and simulation of high temperature resistive superconducting fault current limiters[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2004, 14(2): 839-842.
- [24] 柯其琛, 徐国顺, 庄劲武, 等. YBCO带材过流特性与抗过流能力研究[J]. 低温与超导, 2019, 47(12): 25-31.
KE Qichen, XU Guoshun, ZHUANG Jinwu, et al. Research on the overcurrent characteristics and anti-overcurrent capability of YBCO strips[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2019, 47(12): 25-31.
- 陆利强(1997—), 男, 硕士, 研究方向为电力系统保护及安全运行(E-mail: 534789279@qq.com)。
- 庄劲武(1967—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统保护及其安全运行。