

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240558

计及超级电容快速钳位饱和铁芯电压的直流故障 限流器暂态特性研究

郑峰¹, 黄雯锋¹, 林燕贞², 梁宁³, 刘宝谨¹

(1. 福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108; 2. 国网福建省电力有限公司福州供电公司, 福建 福州 350116; 3. 昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要: 新能源高比例接入直流配电网, 其低惯量、弱阻尼特性将导致故障电流峰值大、上升速率快, 给现有直流断路器的开断容量、速度带来挑战。因此, 提出一种计及超级电容快速钳位饱和铁芯电压的直流故障限流器。该限流器利用超级电容器对串联于主电路的饱和铁芯快速供能, 在检测到故障后通过单移相控制使超级电容快速放电, 在饱和铁芯上产生特定斜率电流以钳位饱和铁芯电压, 进而有效抑制故障电流幅值。此外, 根据电流微分判据识别瞬时性/永久性故障: 瞬时性故障时, 执行无断路器动作行为的系统自恢复; 永久性故障时, 进一步抬升饱和铁芯钳位电压使故障线路电流过零, 直流断路器快速动作、隔离故障线路。最后, 搭建多端直流配电网仿真系统验证所提限流器的有效性。结果表明所提限流器能够有效抑制故障电流, 消除故障区域对非故障区域的负面影响。

关键词: 直流配电网; 超级电容; 饱和铁芯; 故障限流和隔离; 钳位电压

Transient characteristics of a DC fault current limiter considering supercapacitor fast-clamped saturated core voltage

ZHENG Feng¹, HUANG Wenfeng¹, LIN Yanzhen², LIANG Ning³, LIU Baojin¹

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Fuzhou Power Supply Company, State Grid Fujian Electric Power Company, Fuzhou 350116, China;

3. School of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: With the high proportion of renewable energy integrated into DC distribution networks, their low inertia and weak damping characteristics result in high peak fault currents and rapid rise rates, posing challenges to the breaking capacity and speed of existing DC circuit breakers. Therefore, this paper presents a DC fault current limiter which takes into account ultracapacitor fast-clamped saturated core voltage. The current limiter uses a supercapacitor to rapidly energize the saturated core in series with the main circuit. Upon fault detection, a single phase shift control is used to enable the supercapacitor to discharge quickly, generating a specific slope current in the saturated core to clamp its voltage, thereby effectively suppressing the fault current amplitude. In addition, a current differential criterion is used to distinguish transient and permanent faults. For transient faults, the system executes self-recovery without circuit breaker operation. For permanent faults, the clamping voltage of the saturated core is further increased to force the fault line current to zero, enabling the rapid operation of the DC circuit breaker to isolate the faulty section. Finally, a multi-terminal DC distribution network simulation system is established to verify the effectiveness of the proposed current limiter. The results show that the proposed current limiter can effectively suppress the fault current and eliminate the negative impact of faults on non-fault regions.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52167010).

Key words: DC distribution network; supercapacitor; saturated core; fault current limiting and isolation; clamping voltage

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52167010); 福建省自然科学基金项目资助(2022J05026)

0 引言

随着电力电子技术的进步，直流配电网的控制变得更加灵活^[1-3]。然而，在包含分布式电源和电动汽车等应用场景中，直流配电网系统的韧性不足，在应对直流故障时会引发较大的故障电流，对电网的安全运行构成严重威胁。因此，直流配电网故障电流抑制成为研究热点。

当直流配电网发生短路故障时，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^[4-6]，且直流电流没有故障过零点使得现有的直流断路器(DC circuit breaker, DCCB)难以开断故障。目前，故障限流器(fault current limiter, FCL)作为可行的解决方案之一，其将短路故障电流限制到后级断路器可开断的程度，因此得到广泛应用。

文献[7]通过在耦合电感器二次侧增加可控负载，提出了一种限流效果良好的磁耦合电感式故障限流器。文献[8]使用绝缘栅双极晶体管(insulate-gate bipolar transistor, IGBT)来传导正常的操作电流，在故障状态下串联一个限流电感来限制电流。文献[9]提出了一种基于限流电感的 FCL 拓扑结构，能够有效抑制故障电流，其特点是通态损耗低，并且限流电感可以被快速旁路。文献[10]结合电感的低频通导、高频阻断特性以及全控器件的快速控制能力，将直流故障电流转换为高频交变电流，从而实现快速且高效的故障电流抑制。上述几种方法虽可对直流配电网故障电流进行抑制，但是 DCCB 亟需与 FCL 的联合运行策略以达到更好的故障电流抑制效果。文献[11]提出由限流电感及吸能支路组成的混合限流电路，该方法加速故障电流的衰减，但系统的控制响应速度受串联电感值的影响较大。文献[12]将阻感型限流装置与 DCCB 融合，虽然能限制故障电流并辅助 DCCB 开断，但在其稳态时会影响系统动态性能。

综合计及系统稳定性与故障电流抑制效果，本文提出一种计及超级电容快速钳位饱和铁芯电压的直流故障限流器。该 FCL 在检测到故障后通过单移相控制使超级电容快速放电，在饱和铁芯上产生特定斜率电流，钳位饱和铁芯电压，进而有效抑制故障电流幅值。本文首先介绍 FCL 的拓扑结构并对其工作原理进行详细的分析。接着，设计 FCL 的正反向控制策略、瞬时/永久故障判别方法及配合 DCCB 隔离故障策略。最后，通过仿真验证了 FCL 的限流效果有效性和配合 DCCB 隔离故障的可行性。

1 限流器拓扑结构

FCL 的拓扑如图 1 所示，其主要由超级电容组、双有源桥(dual active bridge, DAB)直流变压器以及饱和铁芯组成。超级电容是一种高效、实用的能量存储装置，其功率密度大，储能效率高，具有快速充放电的优势。超级电容组是由多个超级电容串联而成。

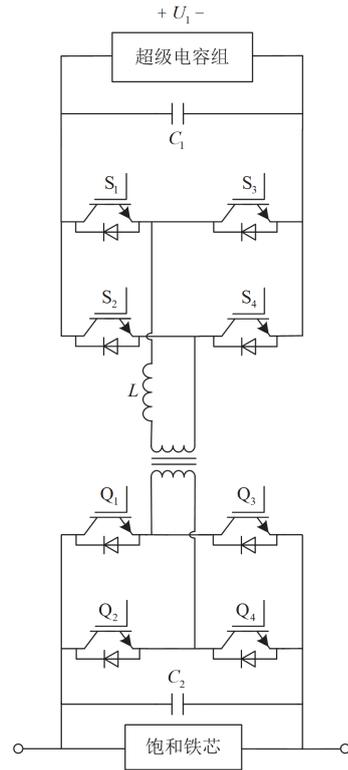


图 1 限流器拓扑

Fig. 1 Structure of FCL

饱和铁芯的结构如图 2 所示，其主要由矩形饱和铁芯和铁芯、铜绕组 1、铜绕组 2、超级电容组、小电阻 R_1 、

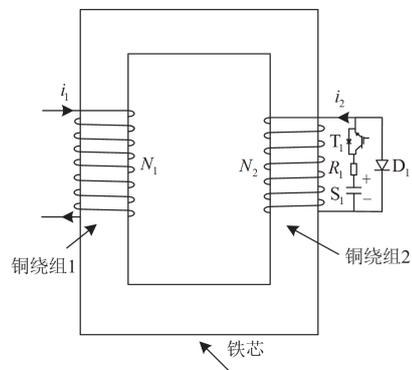


图 2 饱和铁芯结构

Fig. 2 Saturated iron core structure

IGBT 开关管 T_1 以及二极管组成。其中 N_1 、 i_1 代表铜绕组 1 的匝数、电流, N_2 、 i_2 代表铜绕组 2 的匝数、电流, 二极管 D_1 用于给铜绕组 2 提供续流通路。

直流饱和铁芯的磁化曲线如图 3 所示, 铁芯饱和和磁感应强度记为 B_k , 对应的磁场强度记为 H_k 。当饱和铁芯处于饱和区时, 饱和铁芯对外呈现小电感 L_l , 当饱和铁芯处于非饱和区时, 饱和铁芯对外呈现大电感 L_H 。根据电路与磁路方程, 当铁芯各处截面积相等时, 可以推导饱和铁芯的等效电感如式 (1) 所示^[13]。

$$L_{SI} = \frac{N_2^2 S}{l} \left(\mu - \frac{N_2 i_2 - N_1 i_1}{N_1} \frac{d\mu}{di_1} \right) \quad (1)$$

式中: L_{SI} 为饱和铁芯等效电感; S 为铁芯截面积; l 为铁芯长度; μ 为铁芯磁导率。由此可以看出, 饱和铁芯的电感值主要取决于铁芯的磁导率, 同时还会受到磁导率变化速度的影响。

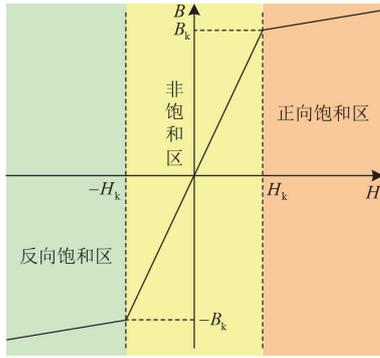


图 3 直流饱和铁芯的磁化曲线

Fig. 3 Magnetization curve of DC saturated core

2 FCL 工作原理

FCL 的工作阶段可大致分为正常运行阶段 ($t_0 < t < t_1$)、故障限流阶段 ($t_1 < t < t_3$)、消除磁饱和阶段 ($t_3 < t < t_4$) 和故障隔离阶段 ($t_4 < t < t_5$)。为方便分析限流器的工作原理, 将超级电容组和 DAB 视为等效电流源。

2.1 正常运行阶段 ($t_0 < t < t_1$)

如图 4 所示, 系统正常运行时, 饱和铁芯被 DAB 模块旁路, 即系统初始运行电流 i_{dc_N} 流经 DAB, $i_1 \approx 0$, 可见限流器并不会影响系统的正常运行。

2.2 故障限流阶段 ($t_1 < t < t_3$)

如图 5 所示, 当检测到直流系统发生短路故障时, 超级电容组通过 DAB 快速放电, 正向设定钳位电压。当 $t_1 < t < t_2$ 时, 系统的直流电流 $i_{dc} = i_1 +$

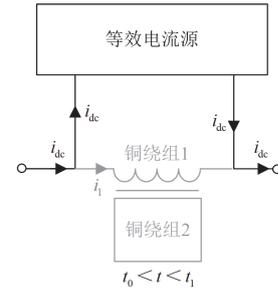


图 4 系统正常运行阶段

Fig. 4 Normal operation stage of the system

i_{cs} , i_{cs} 为 FCL 给饱和铁芯提供的电流。同时保证铜绕组 1 的电流 i_1 线性上升, 使得铜绕组 1 产生钳位电压 U_{set} 。在故障回路中提供钳位电压, 进而控制换流站出口处的电压, 使得 i_{dc} 快速下降。当 $t_2 < t < t_3$ 时, $i_{dc} < i_1$, 等效电流源为铜绕组 1 提供电流, 以保证 i_1 线性上升, 保证钳位电压 U_{set} 的稳定, 此时系统的直流电流 $i_{dc} = i_1 - i_{cs}$ 。在限流器的作用之下, 系统直流电流 i_{dc} 不断下降, 此时以系统直流电流 $i_{dc} = i_{dc_N}$ 为控制目标, 实现系统直流电流 i_{dc} 保持在 i_{dc_N} 。

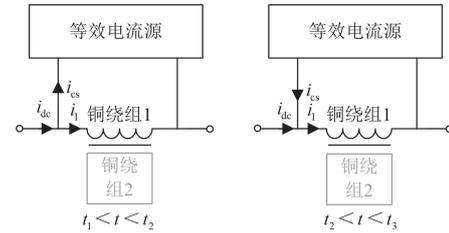


图 5 限流阶段

Fig. 5 Fault current limiting stage

当 $t_1 < t < t_2$ 时, t_1' 时刻钳位电压达到设定值, 用直流源 U_{dc} 以及电阻 R_s 替代换流站, 可求得 t_1' 时刻的故障电流 i_{dc_2} 为^[14]

$$\left\{ \begin{aligned} i_{dc_2} &= i_{dc_1} + \left(\frac{U_{dc} - \int_{t_1}^{t_1'} U_{set} dt}{(t_2 - t_1)(R_{line} + R_s + R_{sc})} - i_{dc_1} \right) \left(1 - e^{-\frac{t-t_1}{\tau_1}} \right) \\ \tau_1 &= \frac{L_1 // L_{SI} + L_{line}}{R_{line} + R_s + R_{sc}} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

式中: R_{line} 、 R_{sc} 、 R_s 分别为线路、短路点以及换流站电阻值; L_1 、 L_{SI} 、 L_{line} 分别为 DAB、饱和铁芯

和线路电感值； i_{dc_1} 为故障检测结束时的系统直流电流值； U_{set}^{\wedge} 为上升的钳位电压； τ_1 为时间常数。

当 $t_1' < t < t_3$ 时， t_2' 时刻故障电流达到系统额定电流值，可求得 t_2' 时刻的故障电流 i_{dc_3} 为

$$\begin{cases} i_{dc_3} = i_{dc_2} + \left(\frac{U_{dc} - U_{set}}{R_{line} + R_s + R_{sc}} - i_{dc_2} \right) \left(1 - e^{-\frac{t-t_1'}{\tau_2}} \right) \\ \tau_2 = \frac{L + L_{line}}{R_{line} + R_s + R_{sc}} \end{cases} \quad (3)$$

式中， τ_2 为时间常数。

2.3 消除磁饱和阶段 ($t_3 < t < t_4$)

如图 6 所示，对于二次侧绕组而言，当检测到饱和和铁芯即将饱和时(由于现有的 IGBT 技术可使得 IGBT 的导通和关断达到微秒级别，因此可认为 IGBT 瞬时导通和关断)^[15]， T_1 导通，使得铜绕组 2 接入电路，增大饱和铁芯的逆磁通以防止铜绕组 1 达到磁饱和，导至其线性上升电流无法维持，从而无法保证钳位电压的稳定。

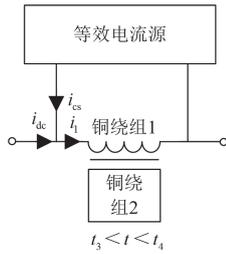


图 6 消除磁饱和阶段

Fig. 6 Removing magnetic saturation stage

2.4 故障隔离阶段 ($t_4 < t < t_5$)

当系统检测到短路故障为瞬时故障时，限流器不再设定钳位电压，铜绕组 1 上的电流送回超级电容组中同时 T_1 关断，待恢复至 i_{dc_N} ，系统恢复初始运行状态。当系统检测到短路故障为永久故障时，此时以系统直流电流 $i_{dc} = 0$ 为控制目标，进一步抬升钳位电压，待检测到直流电流为 0 时，系统给断路器发送分闸命令隔离故障线路，铜绕组 1 上的电流送回超级电容组中同时 T_1 关断。

3 FCL 控制策略

3.1 正向设定钳位电压

DAB 模块是限流器的主要结构，本文采用单移相控制策略，通过控制原副边 H 桥移相角以改变功率大小和方向。控制策略如图 7 所示，以系统直流电流 $i_{dc} = i_{dc_N}$ 为控制目标，将设定的电流值与实际值进行作差之后的结果送入 PI 比较器，然后将产生

的结果与钳位电压给定值与实际值的差值继续作差，再将该作差后产生的结果通过 PI 比较器产生移相比 D_1 ，利用移相控制模块产生原边 H 桥超前副边 H 桥的开关信号，控制限流器正向设定钳位电压。

根据 DAB 的小信号模型可得^[16]

$$\begin{cases} U_{set}(s) = \frac{nU_1T_s}{L} \frac{sL_{Sl}(1-2D)}{s^2C_2L_{Sl}+1} d(s) \\ I_1(s) = \frac{nU_1T_s}{L} \frac{(1-2D)}{s^2C_2L_{Sl}+1} d(s) \end{cases} \quad (4)$$

式中： U_1 为超级电容组电压； L 为变压器漏感； T_s 表示相应开关方波驱动信号的半个开关周期； C_2 为输出侧电容； d 为移相比扰动； D 为移相比； $n = n_1/n_0$ (即 DAB 原副边绕组匝数比)。

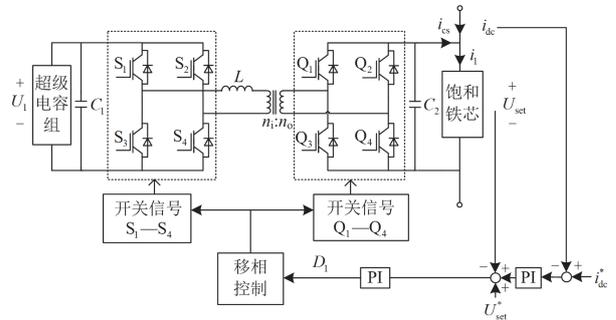


图 7 正向控制策略

Fig. 7 Forward control strategy

电压环正向控制框图如图 8 所示，由图 8 可得

$$I_{dc}(s) = \frac{1}{1+G} I_{dc}^*(s) - \frac{1}{(1+G)G_1(s)} U_{set}^*(s) - \frac{G}{1+G} I_{cs}(s) \quad (5)$$

其中：

$$\begin{cases} G = G_2(s)G_{uo}(s) \\ G_{uo}(s) = \frac{U_{set}(s)}{d(s)} = \frac{nU_1T_s}{L} \frac{sL_{Sl}(1-2D)}{s^2C_2L_{Sl}+1} \end{cases} \quad (6)$$

式中： G_1 与 G_2 为 PI 控制器的传递函数； $I_{dc}^*(s)$ 和 $U_{set}^*(s)$ 分别为系统直流电流 i_{dc} 和钳位电压 U_{set} 的给定值在频域的表达式。

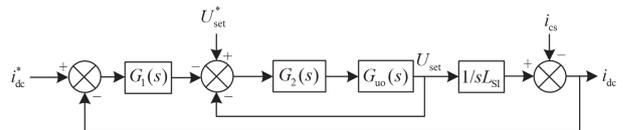


图 8 正向控制框图

Fig. 8 Forward control block diagram

对于不同的故障类型，FCL 设定的钳位电压也不同。本文从检测速度与精度出发，考虑采用适用

于直流系统的电压微分判据结合二次欠压判据的故障检测判据。当故障发生时, 直流侧电压(U_{dc})会出现瞬时变化, 其电压微分量将瞬间达到极大值。根据直流系统参数以及不同故障类型、故障位置和过渡电阻的影响, 确定了电压微分量的影响因素规律, 并选取在规律区间内的电压微分量极小值 T_u 作为判据^[17-18]。当 $(\Delta U_{dc}/\Delta t) > T_u$ 时, 可判定直流系统发生了故障。但仅凭这个判据 $(\Delta U_{dc}/\Delta t) > T_u$ 无法确定具体的故障类型, 无法准确设置限流器的钳位电压。因此需要进一步采取二次欠压判断来进行故障类型判别。

$$\begin{cases} \text{当 } U_{dc}^+ \leq 0.9U_{dcn}^+, \text{ 为单极正极接地故障} \\ \text{当 } U_{dc}^- \leq 0.9U_{dcn}^-, \text{ 为单极负极接地故障} \\ \text{当 } U_{dc}^+ \leq 0.9U_{dcn}^+ \text{ 且 } U_{dc}^- \leq 0.9U_{dcn}^-, \text{ 为极间故障} \end{cases} \quad (7)$$

式中: U_{dc}^+ 和 U_{dc}^- 分别为直流正负极的电压; U_{dcn}^+ 和 U_{dcn}^- 分别为直流正负极电压额定值。

直流系统发生短路故障时的等效电路如图 9 所示, 其电压暂态方程为

$$\begin{cases} u_{DCCB} = u_{dc} - (Z_{line} + Z_{load}) \cdot i_{line} - u_{FCL} \\ u_{DCCB} = u_{DCCB1} + u_{DCCB2} \\ u_Z = Z_{line} \cdot i_{line} = u_{Z1} + u_{Z2} \\ u_{FCL} = u_{FCL1} + u_{FCL2} \\ u_L = Z_{load} \cdot i_{line} \end{cases} \quad (8)$$

式中: u_{DCCB} 为断路器压降; u_Z 为线路阻抗压降; u_L 为输出侧压降; u_{FCL} 为 FCL 压降; Z_{line} 为线路等效阻抗; Z_{load} 为输出等效阻抗; i_{line} 为线路电流; u_{dc} 为直流侧电压。

结合图 9 和式(8), 当系统故障消失瞬间 Z_{load} 将发生突变, 即系统阻抗环境瞬间发生变化, 阻抗呈增大趋势。在该条件下直流系统的线路电流微分量将会瞬间呈现极小值, 此时取 T_i 作为整定判据。

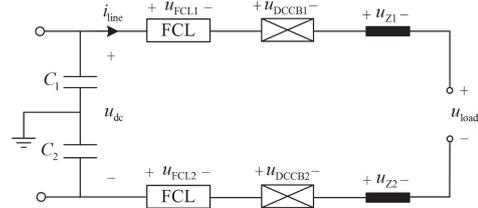


图 9 直流系统故障等效电路

Fig. 9 Fault equivalent circuit of DC system

定义直流系统故障发生后的 t_a 时刻为瞬时/永久故障的区分时间节点, t_f 为故障持续时间。当 $t_f < t_a$ 时, 若线路电流微分量小于 T_i , 即 $(\Delta i_{line}/\Delta t) < T_i$, 则判定直流系统故障消失, 此次故障判定为瞬时性故障。

限流器设定钳位电压的框架图如图 10 所示。其具体的准则如下所述。

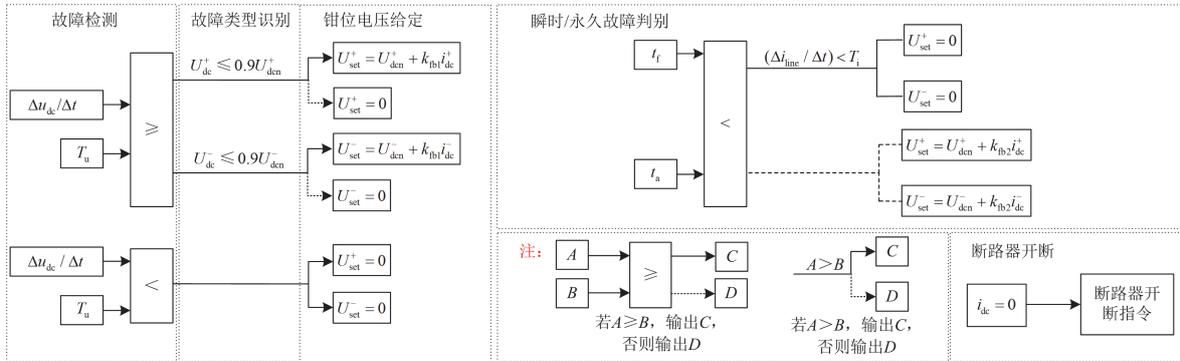


图 10 限流器输出电压

Fig. 10 Current limiter output voltage

1) 在未检测到故障时, 限流器设定输出电压 $U_{set} = 0 \text{ V}$ 。

2) 当系统检测到故障发生且发生了单极故障时, 设定换流站正极电容电压为 U_{dcn}^+ , 负极电容电压为 U_{dcn}^- , 以正极接地故障为例, 正极一侧的限流器设定的输出电压为 $U_{set}^+ = U_{dcn}^+$, 负极一侧的限流器设定的输出电压 $U_{set}^- = 0 \text{ V}$ 。

3) 当系统检测到故障发生且发生了极间故障时, 为了使线路电流快速降低且保持在 i_{dc}^* 以配合断路器隔离故障, 需在电压给定值上引入反馈系数 k_{fb1} 。设定换流站正极电流为 i_{dc}^+ , 负极电流为 i_{dc}^- , 则正极一侧的限流器设定的输出电压为 $U_{set}^+ = U_{dcn}^+ + k_{fb1} i_{dc}^+$, 负极一侧的限流器设定的输出电压为 $U_{set}^- = U_{dcn}^- + k_{fb2} i_{dc}^-$ 。

4) 当 $t_f < t_a$ 时, 且 $(\Delta i_{\text{line}} / \Delta t) < T_i$, 判定为瞬时故障消失, 正极一侧的限流器设定的输出电压为 $U_{\text{set}}^+ = 0 \text{ V}$, 负极一侧的限流器设定的输出电压为 $U_{\text{set}}^- = 0 \text{ V}$ 。当 $t_f > t_a$ 时, 判定为永久故障, 以 $i_{\text{dc}} = 0$ 为控制目标, 抬升限流器钳位电压, 将反馈系数 k_{fb1} 调整为 k_{fb2} 。正极一侧的限流器设定的输出电压为 $U_{\text{set}}^+ = U_{\text{dcn}}^+ + k_{\text{fb2}} i_{\text{dc}}^+$, 负极一侧的限流器设定的输出电压为 $U_{\text{set}}^- = U_{\text{dcn}}^- + k_{\text{fb2}} i_{\text{dc}}^-$ 。

5) 当检测到 $i_{\text{dc}} = 0$ 时, 系统给断路器发送分闸指令, 开断故障。

在限流器设定钳位电压前的这段时间内, 要保证饱和铁芯在这段时间内具有强限流能力, 即在限流过程中饱和铁芯不会进入如图 3 所示的正向饱和区。考虑系统发生最严重故障的情况(即极间短路故障), 电流 i_1 从正常运行时的电流 $i_{1\text{N}}$ 上升至 $i_{1\text{M}}$, 饱和铁芯储存的能量为 W_1 , 可表示为

$$W_1 = \frac{1}{2} L_{\text{H}} i_{1\text{M}}^2 - \frac{1}{2} L_{\text{H}} i_{1\text{N}}^2 \quad (9)$$

当开通 T_1 时, 受控源为饱和铁芯提供的能量为 W_2 [19], 可表示为

$$W_2 = 2SN_2 i_2 B_k \quad (10)$$

铁芯达到反向饱和区的磁场强度为 $-H_k$, 此时可求得饱和铁芯上的电流 $i_{1\text{S}} = H_k l / N_1$ 。保留一定的裕度, 设定饱和铁芯上即将到达反向饱和区的电流为 $i_{1\text{SS}}$, 保留一定的裕度, 因此设定当 $i_{1\text{SS}} = 0.95 i_{1\text{S}}$ 时, 控制 T_1 导通, 使得铁芯达到正向饱和区的磁场强度 H_k 。因此需保证:

$$2SN_2 i_2 B_k = \frac{1}{2} L_{\text{H}} i_{1\text{SS}}^2 - \frac{1}{2} L_{\text{H}} i_{1\text{N}}^2 \quad (11)$$

3.2 反向充电控制策略

饱和铁芯对超级电容组的反向充电控制策略如图 11 所示, 充电过程可分为两个阶段。首先, 在恒流充电阶段, 通过设定恒定充电电流 I_0^* , 同时不断监测超级电容端电压。当检测到某一时刻电压超过预设值 U_1^* 时, 转变为限压充电阶段, 待饱和铁芯恢复初始状态时, 反向充电过程结束。

当饱和铁芯上的能量送回超级电容组中时, 其传输功率表达式为

$$P = \frac{nU_1 U_2 T_s}{2L} D_2 (1 - D_2) \quad (12)$$

式中: U_2 为饱和铁芯的电压; D_2 为恒流控制的移相比。

由式(12)可知, DAB 的反向充电功率与输入电

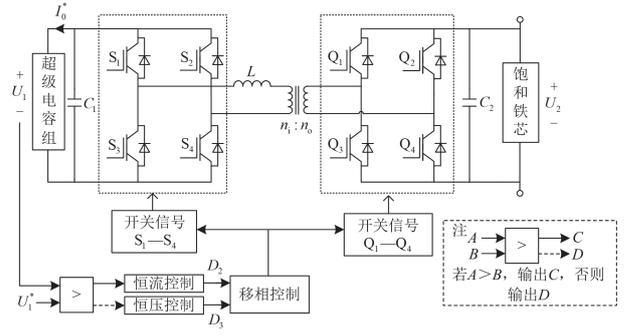


图 11 反向充电控制策略

Fig. 11 Reverse charging control strategy

压、移相比、变压器匝比等相关, 可以通过调节移相比来控制。根据式(13)可以推导出移相比与电流参考值之间的关系式为

$$D_2 = \frac{1}{2} - \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{2LI_0^* T_s}{nU_2}} \quad (13)$$

恒流和恒压控制框图如图 12 所示, 恒流控制时为了实现 DAB 的输出无静差控制, 在移相比计算的基础上, 还需要通过 PI 调节器来补偿功率损耗等因素造成的误差, 如图 12(a)所示。当检测到超级电容电压 U_1 超过预设值 U_1^* , 将超级电容充电模式改变为恒压充电模式时, 采用单电压闭环控制即可, 如图 12(b)所示。

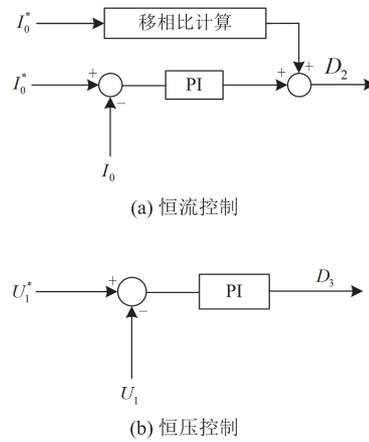


图 12 恒流控制和恒压控制框图

Fig. 12 Constant current control and constant voltage control

3.3 与断路器配合隔离故障策略

机械式直流断路器结构由 3 条支路组成, 即主电流支路、转移支路、耗能支路 [20]。直流断路器在交流断路器基础上加入 LC 振荡结构, 产生反向电流与故障电流相互抵消从而达到过零点。但是 LC 振荡受振荡频率的影响, 存在不稳定性和小电流开断无法可靠熄弧 [21] 等问题。本文所提限流器可使直

流断路器无弧开断, 只需机械开关隔离故障, 所提限流器与直流断路器结构如图 13 所示。

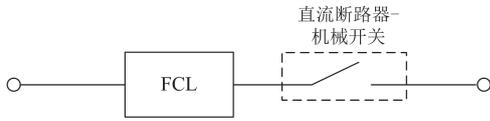


图 13 限流器与直流断路器结构图

Fig. 13 Structure diagram of current limiter and DC circuit breaker

直流断路器动作策略如图 14 所示。当 $t_f < t_a$ 时, 故障消失瞬间, 由 $(\Delta i_{line} / \Delta t) < T_i$ 判据可判断系统发生瞬时故障, 直流断路器不动作, 系统恢复至初始运行状态。当 $t_f > t_a$ 时, 即系统在 t_a 内检测不到 $(\Delta i_{line} / \Delta t) < T_i$, 判断系统发生永久故障, 抬升限流器钳位电压, 待直流电流过零时, 系统给断路器发送分闸指令, 实现机械开关无弧开断, 隔离故障线路。

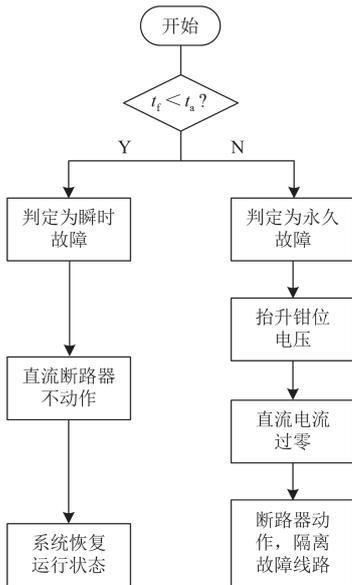


图 14 直流断路器动作策略

Fig. 14 DC circuit breaker operation strategy

4 仿真验证

为验证新型故障限流器的故障电流抑制效果以及配合断路器的故障隔离效果, 利用 Matlab/Simulink 仿真软件搭建如图 15 所示的直流配电网系统。设定换流站出口 5 km 处发生单极接地故障 (f_1), 换流站出口 10 km 处发生极间短路故障 (f_2)。直流配电网系统的相关仿真参数如表 1 所示, 限流器的相关参数如表 2 所示。

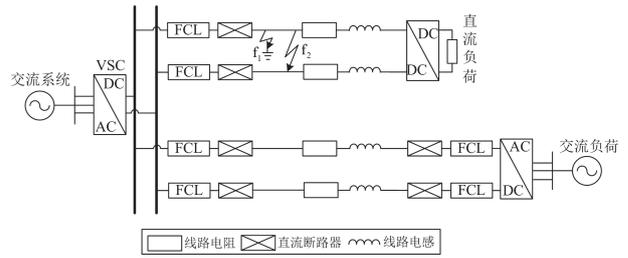


图 15 直流配电网

Fig. 15 DC power distribution network

表 1 直流配电网参数

Table 1 DC distribution network parameters

参数	数值
额定直流电压/kV	10
额定直流电流/A	200
直流侧电容/F	0.001
线路电阻/(Ω/km)	0.01
线路电感/(mH/km)	5
直流负荷/kW	1000
交流负荷/kW	2000
故障检测时间/ms	1

表 2 限流器参数

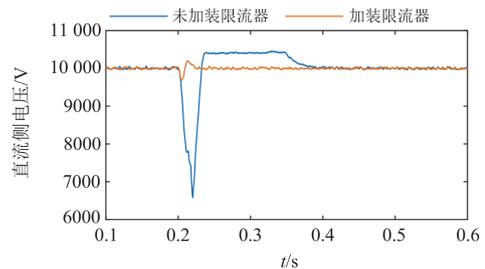
Table 2 Current limiter parameters

参数	数值
L /mH	500
超级电容个数	6
DAB 变压器变比	1:6
单个超级电容电压/kV	0.18
输入侧电容/F	0.0001
输出侧电容/F	0.0005

4.1 瞬时故障分析

令 $t_f = 20 \text{ ms}$, $t_a = 25 \text{ ms}$, 设定 $t = 0.2 \text{ s}$ 时, 配电网在 f_1 和 f_2 处分别发生单极瞬时接地故障和极间瞬时短路故障, 仿真结果分别如图 16 和图 17 所示。

由图 16 可知, f_1 位置发生单极接地故障且没有加装限流器的情况下, 系统直流电流在 0.211 s 达到峰值 1520 A 左右, 对系统产生较大冲击, 非故障线路电流产生明显波动。在加装了限流器的情况下, 系统直流侧电流被快速抑制, 非故障线路电流



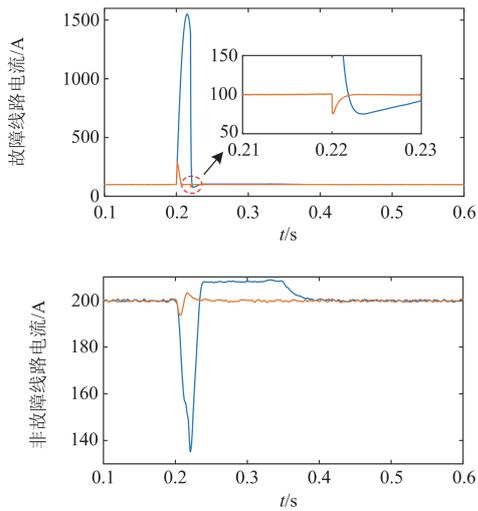


图 16 单极瞬时接地故障仿真结果

Fig. 16 Simulation results of unipolar instantaneous fault

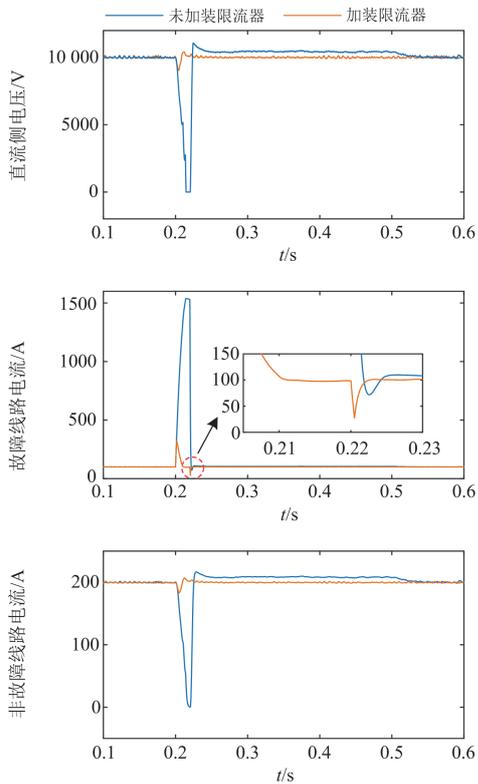


图 17 极间瞬时短路故障仿真结果

Fig. 17 Simulation results of instantaneous fault between electrodes

无明显波动。在 $t = 0.22$ s 时，故障线路电流出现明显跌落，检测为瞬时故障，断路器不动作，随后系统恢复至初始状态。

由图 17 可知， f_2 位置发生极间瞬时短路故障且没有加装限流器的情况下，系统直流侧电压发生

明显跌落，故障线路电流在 0.212 s 达到峰值 1540 A 左右，非故障线路电流迅速跌落。在加装了限流器的情况下，故障线路电流峰值仅达到 323 A，非故障线路电流无明显波动。在 $t = 0.22$ s 时，故障线路电流出现明显跌落，检测为瞬时故障，断路器不动作随后系统恢复至初始状态。

4.2 永久故障分析

令 $t_a = 25$ ms，设定 $t = 0.2$ s 时配电网在 f_1 和 f_2 处分别发生单极永久接地故障和极间永久短路故障，仿真结果分别如图 18 和图 19 所示。由图 18 可知， f_1 位置发生单极接地故障且没有加装限流器的情况下，故障线路电流在 0.211 s 达到峰值 1520 A 左右，对系统产生较大冲击，非故障线路电流有较大波动。由图 19 可知， f_2 位置发生极间短路故障且没有加装限流器的情况下，系统直流侧电压发生明显跌落，故障线路电流在 0.211 s 达到峰值 1540 A 左右，非故障线路电流迅速跌落至 0。在加装了限流器的情况下，两种类型故障发生时，故障线路电流被快速抑制，非故障线路电流无明显波动。在 $t = 0.225$ s 时，故障线路电流无明显跌落，检测为永久故障，抬升钳位电压，待故障线路电流过零时，系统给断路器发送分闸指令，隔离故障线路。

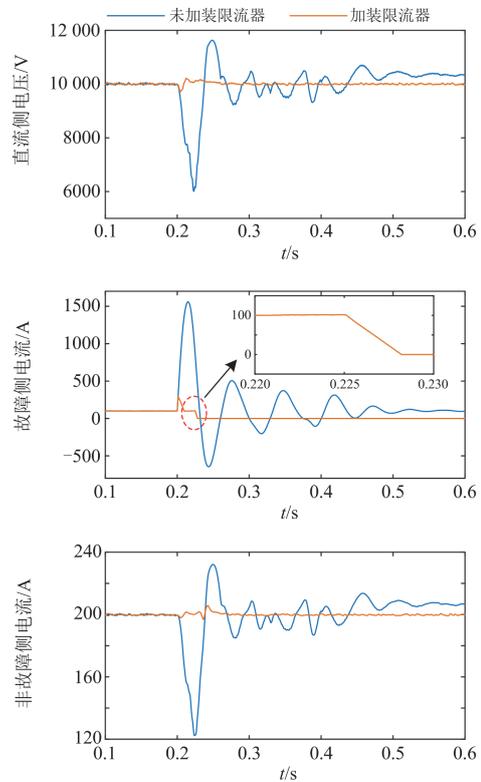


图 18 单极永久故障仿真结果

Fig. 18 Simulation results of single pole short circuit fault

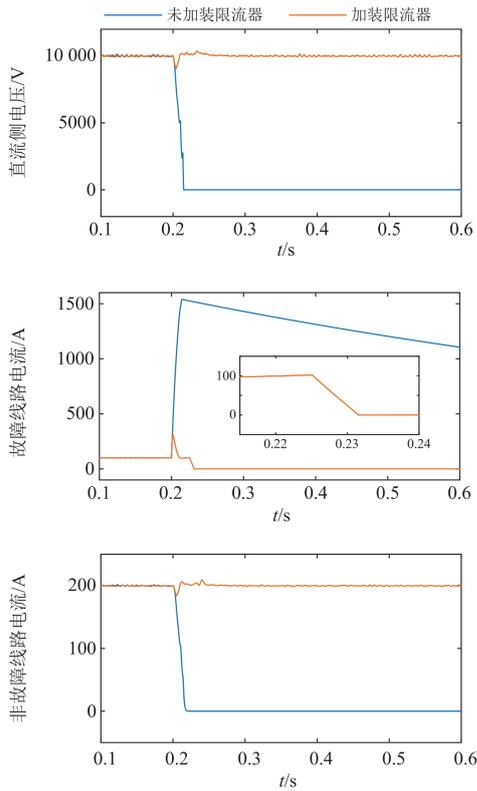


图 19 极间永久故障仿真结果

Fig. 19 Simulation results of inter-electrode short circuit fault

4.3 限流效果对比及不同故障隔离方案对比

验证 FCL 抑制故障电流的有效性, 在极间永久故障下无断路器协同进行以下 5 组仿真: 1) 以系统直流电流 $i_{dc} = 0$ 为控制目标, 抬升本文所提 FCL 钳位电压; 2) 仿真文献[22]所提限流器(CIB-FCL); 3) 仿真文献[23]所提限流器(HFCL); 4) 仿真文献[24]所提限流器(CI-FCL); 5) 仿真文献[25]所提限流器(SI-SFCL)。

由图 20 可知, 当 $t = 0.2$ s 时发生极间永久短路故障, 利用本文所提 FCL 进行故障限流, 故障电流峰值约为 323 A, 且其在 0.213 s 处过零。当利用文献[22]的限流器进行限流时, 由于本文设置的故障检测时间为 1 ms, 因此文献[22]限流器在 $t = 0.2015$ s 时由预限流工作状态转换为限流工作状态, 此时其故障电流峰值约为 347 A, 随后故障电流快速下降至稳态值 95 A 左右。当利用文献[23]的限流器进行限流时, 在其换相后, 将限流电阻和限流电抗投入系统改变二阶电路时间常数进一步抑制故障电流, 故障电流峰值约为 714 A。当利用文献[24]的限流器进行限流时, 其利用副边电感的限流支路限制故障电流的幅值, 故障电流峰值约为 1020 A。当利用文献

[25]的限流器进行限流时, 在其检测到故障后将限流电阻单元投入系统与饱和和铁芯复合限流, 故障电流峰值约为 572 A。本文所提 FCL 限流时的故障电流峰值相比于文献[22-25]分别降低了 6.9%、54.8%、68.3%、43.5%, 且本文 FCL 可将故障电流快速过零, 实现直流断路器的无弧开断。

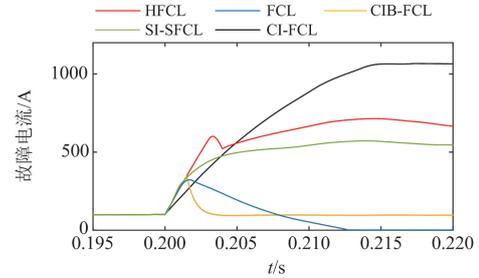


图 20 限流效果对比仿真结果

Fig. 20 Simulation results of current limiting effect comparison

同时为验证 FCL 配合断路器的故障隔离效果, 将本文所提方案与其他限流开断方案进行对比。方案 1 为本文所提 FCL 配合直流断路器隔离故障; 方案 2 使用 HDCCB 开断故障; 方案 3 为文献[22]配合 HDCCB 开断故障; 方案 4 为文献[23]配合 HDCCB 开断故障。设置 HDCCB 的分断时间为检测到故障后的 5 ms^[23], 以极间永久故障为例, 仿真对比图如图 21 所示。

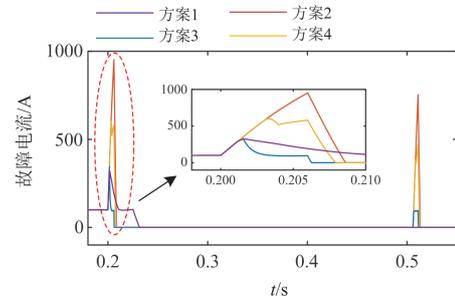


图 21 不同隔离方案对比分析

Fig. 21 Comparative analysis of different isolation schemes

由图 21 可知, 方案 1—方案 4 中直流断路器的分断电流分别为 0 A、952 A、97 A、581 A, 这表明方案 1 为直流断路器提供了更为理想的开断环境。在故障隔离方面, 方案 2、3、4 的故障隔离时间分别为 8.62 ms、7.9 ms、6.2 ms, 然而这 3 种方案无瞬时/永久故障识别方法, 在面对永久故障时需进行重合闸, 方案 1 则是通过延长故障持续时间避免直流断路器重合闸, 进而避免故障电流对系统造成二次冲击。

4.4 经济性讨论

分别选取 ABB 混合式直流断路器、文献[22]所提限流器配合混合直流断路器、文献[23]所提限流器配合混合直流断路器与本文所提隔离策略在切断相同故障时(以极间永久故障为例)进行相关经济性分析。本文限流器主要成本来自 IGBT 开关管和超级电容。3.3 kV/1 kA IGBT 单价 13 599 元左右 (FD1000R33HE3KBPSA1 Infineon Technologies | 分立半导体产品 | DigiKey), 超级电容 180 V/6 F 2610-SM0006-180-P-ND 单价 6552 元左右 (SM0006-180-P LICAP Technologies, Inc. | 电容器 | DigiKey)。根据文献[26]及查阅市场价格, 可得出所需器件成本如附录 A 表 A1 所示。

由附录 A 图 A1 可得, HDCCB 中 IGBT 所承受电压幅值为 30 kV, 承受电流幅值为 952 A, 文献[23]中 IGBT 所承受电压幅值为 30 kV, 承受电流幅值为 600 A, 文献[22]中 IGBT 所承受电压幅值为 30 kV, 承受电流幅值为 347 A。由附录 A 图 A2、图 A3 可得本文 FCL 中 IGBT 所承受电压幅值为 5.3 kV, 承受电流幅值为 740 A, 附录 A 表 A2 整理了 4 种拓扑所需的成本。

根据附录 A 表 A2 所示的数据, 可得出本文隔离策略所需成本约为 ABB 混合式直流断路器成本的 66.4%和文献[22]成本的 75.74%, 与文献[23]成本接近。且本文所提策略不需要重合闸判断故障类型, 因此在直流断路器动作次数以及损耗方面, 本文所提方案也具有一定优势。

5 结论

本文提出一种计及超级电容快速钳位饱和和铁芯电压的直流限流器, 分析了其工作原理并设计相应的控制策略。在仿真系统中对其进行验证, 得到如下结论:

1) FCL 有效抑制故障电流幅值, 在面对极间短路故障时, 与 HFCL、CIB-FCL、CI-FCL、SI-SFCL 相比, 所提 FCL 限流时的故障电流峰值分别降低了 6.9%、54.8%、68.3%、43.5%。

2) 本文所提瞬时/永久故障判别方法可针对瞬时故障无断路器动作行为系统自恢复, 针对永久故障进一步抬升限流器钳位电压, 将故障电流快速过零, 配合断路器实现无弧开断, 避免断路器重合闸对系统造成二次冲击, 对系统稳定性影响较小。

3) 与现有限流开断方案进行仿真对比, 本文所提限流开断方案可使故障电流过零, 为直流断路器提供了更为理想的开断环境。

附录 A

表 A1 器件成本

Table A1 Device cost

器件	成本/p.u.
3.3 kV/1 kA IGBT	1.00
4.5 kV/150 μF 薄膜电容	0.12
4.5 kV/3 kA 快恢复二极管	0.17
4.5 kV/3 kA 晶闸管	0.24
4.5 kV/3 kA 电感	0.12
180 V/6 F 超级电容	0.5
LCS 散热装置	1

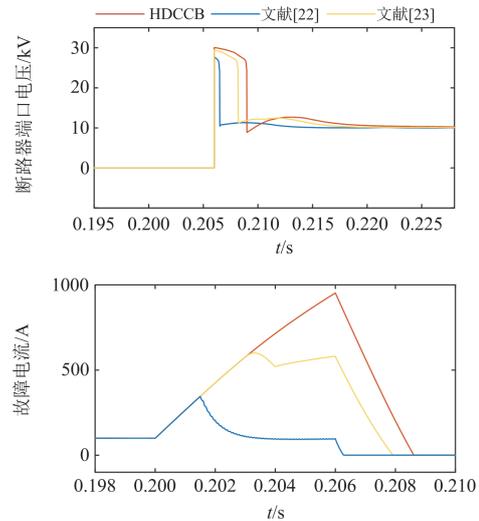


图 A1 不同隔离策略对比

Fig. A1 Comparison of different isolation strategies

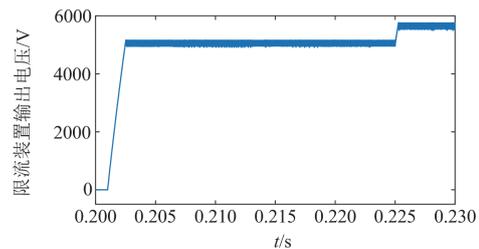


图 A2 限流器输出电压

Fig. A2 Current limiter output voltage

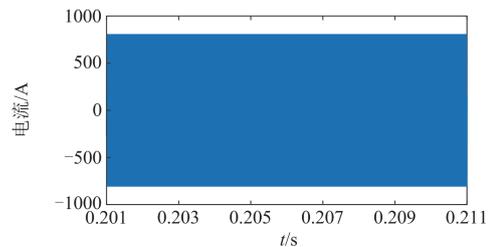


图 A3 DAB 一次侧电流

Fig. A3 DAB primary side current

表 A2 不同方案对比
Table A2 Comparison of different schemes

拓扑结构	3.3 kV/1 kA IGBT	二极管/ 晶闸管	晶闸管	LCS	电感	电容	电源	是否需要 重合闸	总成本/p.u.
ABB	串联数: 10 并联数: 2 成本: 40	0	0	IGBTs: 4 散热装置: 2 成本: 6	0	0	0	需要	46
文献[22]	串联数: 10 并联数: 1 成本: 20	0	数量: 16 成本: 3.84	IGBTs: 4 散热装置: 2 成本: 6	数量: 4 成本: 0.48	数量: 2 成本: 0.24	0	需要	30.56
文献[23]	串联数: 10 并联数: 1 成本: 20+6	数量: 8 成本: 1.36	数量: 2 成本: 0.48	IGBTs: 8 散热装置: 4 成本: 12	数量: 4 成本: 0.48	0	0	需要	40.32
本文所提 方案	数量: 18 成本: 18	数量: 2 成本: 0.34	0	无	数量: 6 成本: 0.72 + (饱和 铁芯) $\times 4 = 4.72$	4 成本: 0.48	数量: 14 成本: 7	不需要	30.54

参考文献

- [1] 唐欣, 黄晟, 潘一彬, 等. 直流故障下基于交流侧馈能的 MMC 换流站主动限流策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(9): 56-64.
TANG Xin, HUANG Sheng, PAN Yibin, et al. Active current limiting strategy of an MMC converter station based on AC side energy feedback under a DC fault[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(9): 56-64.
- [2] YANG K, GE H, WANG X, et al. A self-charging artificial current zero DC circuit breaker based on superconducting fault current limiter[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(2): 1-5.
- [3] 陈新岗, 张金京, 马志鹏, 等. 基于 MMC 的光伏直流升压并网系统故障分析及限流控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(22): 145-154.
CHEN Xingang, ZHANG Jinjing, MA Zhipeng, et al. MMC-based fault analysis and current-limiting control strategy for a photovoltaic DC boost grid-connected system[J]. Power System Protection and Control, 2019, 51(22): 145-154.
- [4] 王琛, 魏子文, 王毅, 等. 一种新型 MMC 并联双端口子模块及其三阶段故障电流阻断机理[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1): 81-92.
WANG Chen, WEI Ziwen, WANG Yi, et al. A novel MMC parallel dual-port submodule and its three-stage fault current blocking mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1): 81-92.
- [5] QI L, CAIROLI P, PAN Z, et al. Solid-state circuit breaker protection for DC shipboard power systems: breaker design, protection scheme, validation testing[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(2): 952-960.
- [6] 刘宇昂, 戴志辉, 杨明玉, 等. 柔性直流电网故障电流复合抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(11): 93-101.
LIU Yuang, DAI Zhihui, YANG Mingyu, et al. Composite fault-current suppression strategy for flexible DC grids[J]. Power Systems Protection and Control, 2024, 52(11): 93-101.
- [7] NIE Z, YU Z, GAN Z, et al. Topology modeling and design of a novel magnetic coupling fault current limiter for VSC DC grids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(4): 4029-4041.
- [8] MOHSENZADE S, ZARGHANI M, KABOLI S. A series stacked IGBT switch to be used as a fault current limiter in HV high-power supplies[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(5): 6300-6314.
- [9] 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.
- [10] 李春华, 赵成勇, 刘羽超, 等. 一种新型 HVDC 直流限流器拓扑设计与分析[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1819-1824.
LI Chunhua, ZHAO Chengyong, LIU Yuchao, et al. Analysis and design of topological structure for a new HVDC current limiter[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1819-1824.
- [11] 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.
- [12] WANG Y, YUAN Z, WEN W, et al. Generalised protection strategy for HB-MMCMTDC systems with RL-FCL under DC faults[J]. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 2018, 1(5): 1231-1239.
- [13] 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.
- [14] LI D, UKIL A. Adaptive solid-state circuit breaker without varistors in VSC-interfaced DC system[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 5, pp. 4824-4835, May 2022.
- [15] 宋国兵, 王婷, 张保会, 等. 利用电力电子装置的探测式故障识别技术分析与展望[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(20): 173-183.
SONG Guobing, WANG Ting, ZHANG Baohui, et al. Analysis and prospect of detective fault identification technologies using power electronic device[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(20): 173-183.
- [16] 郭腾. 基于 DAB 的电池充放电控制及 SOC 估算研究[D]. 银川: 北方民族大学, 2022.
GUO Teng. Research on battery charge and discharge control and SOC estimation based on DAB[D]. Yinchuan: Northern University for Nationalities, 2022.
- [17] 高本锋, 董沛毅, 刘辛晔, 等. 高压直流输电线路微分欠压保护特性与定值整定[J]. *电网技术*, 2015, 39(8): 2303-2311.
GAO Benfeng, DONG Peiyi, LIU Xinye, et al. Research of HVDC transmission line differential under-voltage protection characteristics and value setting[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(8): 2303-2311.
- [18] 秦瑜, 文明浩, 白宇, 等. 在线估计判据极值的高压直流线路新型距离保护[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(12): 185-194.
QIN Yu, WEN Minghao, BAI Yu, et al. A novel distance protection scheme for HVDC transmission lines based on criterion extremum online estimation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(12): 185-194.
- [19] 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.
- [20] 李斌, 李鹏宇, 温伟杰, 等. 机械式直流断路器性能分析及谐振换流方法[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(9): 2139-2149.
LI Bin, LI Pengyu, WEN Weijie, et al. Performance analysis and resonant commutation method of mechanical DC circuit breaker[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(9): 2139-2149.
- [21] WEN Weijie, WANG Yizhen, LI Bin, et al. Transient current interruption characteristics of a novel mechanical DC circuit breaker[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(11): 9424-9431.
- [22] 王振浩, 王尉, 侯兆静, 等. 耦合电感式双向直流限流器及其与直流断路器的联合运行策略[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(7): 2520-2532.
WANG Zhenhao, WANG Wei, HOU Zhaojing, et al. Coupled inductor bidirectional fault current limiter and its joint operation strategy with DC circuit breaker[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(7): 2520-2532.
- [23] 赵西贝, 许建中, 苑津莎, 等. 一种阻感型电容换相混合式限流器[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(1): 236-244, 338.
ZHAO Xibei, XU Jianzhong, YUAN Jinsha, et al. A resistor and reactor type capacitor commutated hybrid fault current limiter[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(1): 236-244, 338.
- [24] 张烁, 邹贵彬, 张成泉, 等. 基于耦合电感的直流故障限流器[J]. *电力自动化设备*, 2024, 44(4): 82-87.
ZHANG Shuo, ZOU Guibin, ZHANG Chengquan, et al. DC fault current limiter based on coupled inductor[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2024, 44(4): 82-87.
- [25] 路佳宁, 信赢, 王常骐, 等. 一种基于饱和和铁心型超导限流器的混合直流限流电路的研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(6): 43-52.
LU Jianing, XIN Ying, WANG Changqi, et al. Research on an SI-SFCL-based hybrid DC current-limiting circuit[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(6): 43-52.
- [26] 贾冠龙, 于新超, 苑宇辰, 等. 一种具有预限流能力的柔性直流断路器[J]. *电网技术*, 2023, 47(12): 5129-5142.
JIA Guanlong, YU Xinchao, YUAN Yuchen, et al. Flexible DC circuit breaker with pre-limiting current capability[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(12): 5129-5142.

收稿日期: 2024-05-08; 修回日期: 2024-10-14

作者简介:

郑峰(1983—), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为直流配电网系统保护与运行。E-mail: zf_wuhu@163.com

(编辑 魏小丽)